



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD AZCAPOTZALCO**

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

**DETECCIÓN DE DAÑO ESTRUCTURAL EN MARCOS
TRIDIMENSIONALES BASADO EN CAMBIOS EN
ENERGÍA MODAL**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**

P R E S E N T A

ISAAC MARÍN JASSO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MANUEL E. RUIZ-SANDOVAL HERNÁNDEZ

CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2017

Agradecimientos

A mi familia, por su apoyo moral incondicional, sus consejos y su paciencia. Todo lo que soy hoy, es gracias a ella.

Al Dr. Manuel E. Ruiz-Sandoval Hernández, por su apoyo, dirección y asesoría.

A los profesores del Posgrado en Ingeniería Estructural de la UAM, por su aporte en mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), por su apoyo económico para financiar mis estudios de posgrado.

Índice de Contenido

Capítulo 1. Introducción.....	8
1.1. Identificación de daño en sistemas estructurales y mecánicos por cambios en sus características de vibración	8
1.1.1. Alcance en la detección de daño.....	8
1.1.2. Métodos de identificación de daño	8
1.1.3. Identificación de daño aplicada a estructuras específicas	10
1.1.4. Problemas en la identificación de daño.....	12
1.2. Objetivos de la tesis.....	13
1.2.1. General	13
1.2.2. Particulares	13
1.3. Estructura de la tesis.....	13
Capítulo 2. El daño en las estructuras	14
2.1. Cambios en las propiedades dinámicas	15
2.2. Parámetro de daño.....	15
Capítulo 3. Consideraciones para el modelado y análisis numérico	17
3.1. Análisis de sensibilidad del comportamiento dinámico	18
Capítulo 4. Análisis paramétrico.....	19
4.1. Modelo de tres niveles.....	19
4.1.1. Análisis con formas modales completas	20
4.1.2. Análisis con formas modales incompletas	25
4.2. Modelo de 7 niveles	30
4.2.1. Unidaño	32
4.2.2. Multidaño	35
4.2.3. Daño incremental	37
Capítulo 5. Propuesta de metodología de detección de daño estructural.....	38
5.1. Procedimiento del análisis de detección de daño.....	40
5.2. Ejemplo 1, daño principal en columnas de entrepiso 1	42
5.2.1. Paso 1, definición de entrepiso dañado.....	43
5.2.2. Paso 2, definición de elementos dañados	45
5.3. Ejemplo 2, daño principal en columnas de entrepiso 2	48
5.3.1. Paso 1, definición de entrepiso dañado.....	49
5.3.2. Paso 2, definición de elementos dañados	50
5.4. Ejemplo 3, daño principal en vigas de entrepiso 1.....	55

5.4.1. Paso 1, definición de entrepiso dañado	55
5.4.2. Paso 2, definición de elementos dañados	56
5.5. Ejemplo 4, daño principal en vigas de entrepiso 2.....	60
5.5.1. Paso 1, definición de entrepiso dañado	60
5.5.2. Paso 2, definición de elementos dañados	61
Capítulo 6. Simulación experimental.....	65
6.1. Algoritmo de Realización de Sistemas Característicos (ERA)	65
6.1.1. Formulación básica.....	65
6.2. Técnica de Decremento Aleatorio	68
6.2.1. Funciones de decremento aleatorio (funciones DA) y vibración libre	68
6.2.2. Estimación de las funciones de decremento aleatorio	68
6.3. Criterio de correlación modal (Modal Assurance Criterion, MAC).....	69
6.4. Procedimiento del análisis	70
6.5. Vibración ambiental	72
6.5.1. Ejemplo 2, daño principal en columnas de entrepiso 2	72
6.5.2. Ejemplo 4, daño principal en vigas de entrepiso 2.....	77
6.6. Vibración forzada.....	80
6.6.1. Ejemplo 2, daño principal en columnas de entrepiso 2	80
6.6.2. Ejemplo 4, daño principal en vigas de entrepiso 2.....	85
Capítulo 7. Conclusiones.....	87
Capítulo 8. Trabajos futuros	88
Capítulo 9. Bibliografía.....	89

Índice de Figuras

Figura 1. Sistema discreto y sistema continuo.....	17
Figura 2. Sub-estructuración del elemento “i”.....	17
Figura 3. Estructura de prueba para análisis de sensibilidad.....	18
Figura 4. Modelo de tres niveles.	19
Figura 5. Modelo de 7 niveles.	30
Figura 6. Casos de unidaño a)	31
Figura 7. Casos de unidaño b).....	31
Figura 8. Distribución de sensores, paso 1.	40
Figura 9. Distribución de sensores, paso 2.	41
Figura 10. Distribución y orientación de elementos en planta, entrepiso 1.....	42
Figura 11. Distribución y orientación de elementos en planta, entrepiso 2.....	48

Índice de Tablas

Tabla 1. Propiedades dinámicas del modelo de 7 niveles.	30
Tabla 2. Tipos de daño.	40
Tabla 3. Elementos dañados, ejemplo 1.	42
Tabla 4. Elementos dañados, ejemplo 2.	48
Tabla 5. Elementos dañados, ejemplo 3.	55
Tabla 6. Elementos dañados, ejemplo 4.	60
Tabla 7. Parámetros de Markov.....	66
Tabla 8. Error MAC, vibración ambiental, ejemplo 2.	72
Tabla 9. Error MAC, vibración ambiental, ejemplo 4.	77
Tabla 10. Error MAC, vibración forzada, ejemplo 2.	80
Tabla 11. Error MAC, vibración forzada, ejemplo 4.....	85

Índice de Gráficas

Gráfica 2.1. Diagrama típico de momentos envolvente de columnas.	14
Gráfica 2.2. Diagrama típico de momentos envolvente de vigas.	14
Gráfica 3.1. Convergencia de los periodos de vibrar respecto al nivel de discretización.	18
Gráfica 4.1. Análisis paramétrico, daño en nodo inferior de C-2.....	20
Gráfica 4.2. Análisis paramétrico, daño en nodo superior de C-2.	20
Gráfica 4.3. Análisis paramétrico, daño en nodo inferior de C-6.....	21
Gráfica 4.4. Análisis paramétrico, daño en nodo superior de C-6.	21
Gráfica 4.5. Análisis paramétrico, daño en nodo inferior de C-10.....	22
Gráfica 4.6. Análisis paramétrico, daño en nodo superior de C-10.	22
Gráfica 4.7. Análisis paramétrico, casos de daño a) + e).	23
Gráfica 4.8. Análisis paramétrico, casos de daño a) + d).	23
Gráfica 4.9. Análisis paramétrico, casos de daño d) + e).	24
Gráfica 4.10. Análisis paramétrico, caso de daño a), modos incompletos.	25
Gráfica 4.11. Análisis paramétrico, caso de daño b), modos incompletos.	25
Gráfica 4.12. Análisis paramétrico, caso de daño c), modos incompletos.	26
Gráfica 4.13. Análisis paramétrico, caso de daño d), modos incompletos.	26
Gráfica 4.14. Análisis paramétrico, caso de daño e), modos incompletos.	27
Gráfica 4.15. Análisis paramétrico, caso de daño f), modos incompletos.	27
Gráfica 4.16. Variabilidad del patrón de daño ante distinto nivel de daño.	28
Gráfica 4.17. Patrón de daño sin afectar por factor de participación modal.	28
Gráfica 4.18. Patrón de daño afectado por factor de participación modal.	29
Gráfica 4.19. Análisis de daño incremental, modelo de tres niveles.	29
Gráfica 4.20. Incremento de energía potencial en columnas debido a daño existente en columna 5.	32
Gráfica 4.21. Incremento de energía potencial en vigas debido a daño existente en columna 5.	32
Gráfica 4.22. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (caso a).	32
Gráfica 4.23. Análisis paramétrico, cambio de energía en vigas (caso a).	33
Gráfica 4.24. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (caso b1).	33
Gráfica 4.25. Análisis paramétrico, cambio de energía en vigas (caso b1).	33
Gráfica 4.26. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (caso b2).	33
Gráfica 4.27. Análisis paramétrico, cambio de energía en vigas (caso b2).	34
Gráfica 4.28. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (caso b3).	34
Gráfica 4.29. Análisis paramétrico, cambio de energía en vigas (caso b3).	34
Gráfica 4.30. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (Multidaño caso a).	35
Gráfica 4.31. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (Multidaño caso b1).	35
Gráfica 4.32. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (Multidaño caso b2).	35
Gráfica 4.33. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (Multidaño caso b3).	36
Gráfica 4.34. Análisis paramétrico, cambio de energía en vigas (Multidaño caso a).	36
Gráfica 4.35. Error entre daño modelado y suma de vectores U_{dj}	36
Gráfica 4.36. Variación de la energía desarrollada con respecto al nivel de daño.	37
Gráfica 4.37. Variación del nivel de daño con respecto a la energía normalizada.	37
Gráfica 5.1. Elementos dañados, ejemplo 1.....	42
Gráfica 5.2. Matriz de daño a nivel entepiso, ejemplo 1.	43
Gráfica 5.3. Vector de incremento de energía potencial por entepiso $\{\Delta P\}$, ejemplo 1.	43

Gráfica 5.4. Acumulado de casos de daño, paso 1, ejemplo 1.	44
Gráfica 5.5. Acumulado reducido de casos de daño, paso 1, ejemplo 1.	44
Gráfica 5.6. Entrepisos dañados, ejemplo 1.....	44
Gráfica 5.7. Matriz de daño a nivel elemento, ejemplo 1.	45
Gráfica 5.8. Vector de incremento de energía potencial por elemento $\{\Delta P\}$, ejemplo 1.	45
Gráfica 5.9. Vector de escalamiento $\{D\}$, ejemplo 1.....	46
Gráfica 5.10. Comparación entre vector $\{\Delta p\}$ y producto $[Ud]*\{D\}$, ejemplo 1.	46
Gráfica 5.11. Elementos dañados detectados, ejemplo 1.	47
Gráfica 5.12. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 1.....	47
Gráfica 5.13. Elementos dañados, ejemplo 2.....	48
Gráfica 5.14. Vector de incremento de energía potencial por entrepiso $\{\Delta P\}$, ejemplo 2.	49
Gráfica 5.15. Acumulado de casos de daño, paso 1, ejemplo 2.	49
Gráfica 5.16. Entrepisos dañados, ejemplo 2.....	50
Gráfica 5.17. Matriz de daño a nivel elemento, ejemplo 2.	50
Gráfica 5.18. Vector de incremento de energía potencial por elemento $\{\Delta P\}$, ejemplo 2.	51
Gráfica 5.19. Acumulado de casos de daño, ejemplo 2.	51
Gráfica 5.20. Elementos dañados detectados, ejemplo 2, resultados 1 a 4.....	52
Gráfica 5.21. Nuevo acumulado de casos de daño, ejemplo 2.	53
Gráfica 5.22. Nuevo acumulado reducido de casos de daño, ejemplo 2.	53
Gráfica 5.23. Elementos dañados detectados, ejemplo 2, resultados 5 y 6.	54
Gráfica 5.24. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 2.....	54
Gráfica 5.25. Elementos dañados, ejemplo 3.....	55
Gráfica 5.26. Vector de incremento de energía potencial por entrepiso $\{\Delta P\}$, ejemplo 3.	55
Gráfica 5.27. Entrepisos dañados, ejemplo 3.....	56
Gráfica 5.28. Vector de incremento de energía potencial por elemento $\{\Delta P\}$, ejemplo 3.	56
Gráfica 5.29. Elementos dañados detectados, ejemplo 3, resultado 1.....	57
Gráfica 5.30. Acumulado de casos de daño, paso 2, ejemplo 3.	57
Gráfica 5.31. Acumulado reducido de casos de daño, paso 2, ejemplo 3.	58
Gráfica 5.32. Elementos dañados detectados, ejemplo 3, resultados 2 a 5.....	58
Gráfica 5.33. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 3.....	59
Gráfica 5.34. Elementos dañados, ejemplo 4.....	60
Gráfica 5.35. Vector de incremento de energía potencial por entrepiso $\{\Delta P\}$, ejemplo 4.	60
Gráfica 5.36. Entrepisos dañados, ejemplo 4.....	61
Gráfica 5.37. Vector de incremento de energía potencial por elemento $\{\Delta P\}$, ejemplo 4.	61
Gráfica 5.38. Elementos dañados detectados, ejemplo 4, resultado 1.....	62
Gráfica 5.39. Acumulado de casos de daño, paso 2, ejemplo 4.	62
Gráfica 5.40. Acumulado reducido de casos de daño, paso 2, ejemplo 4.	63
Gráfica 5.41. Elementos dañados detectados, ejemplo 4, resultados 2 a 5.....	63
Gráfica 5.42. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 4.....	64
Gráfica 6.1. Ejemplo de decimación de la respuesta.	70
Gráfica 6.2. Segmento de tiempo “i” de la respuesta en el punto “j”.....	70
Gráfica 6.3. Función DA de auto-relación del segmento “i” de la respuesta en el punto “j”.	71
Gráfica 6.4. Excitación ambiental.	72
Gráfica 6.5. $\{\Delta P\}$ utilizando modos obtenidos con ERA vs modos analíticos, vibración ambiental, ejemplo 2.....	72
Gráfica 6.6. Acumulado de casos de daño, vibración ambiental, ejemplo 2.	73
Gráfica 6.7. Elementos dañados detectados, vibración ambiental, ejemplo 2, resultados 1 a 4.	74

Gráfica 6.8. Acumulado de casos de daño, vibración ambiental, ejemplo 2, coeficiente aumentado.	75
Gráfica 6.9. Acumulado reducido de casos de daño, vibración ambiental, ejemplo 2, coeficiente aumentado.	75
Gráfica 6.10. Elementos dañados detectados, vibración ambiental, ejemplo 2, resultados 5 y 6.	76
Gráfica 6.11. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 2, vibración ambiental.	76
Gráfica 6.12. $\{\Delta P\}$ utilizando modos obtenidos con ERA vs modos analíticos, vibración ambiental, ejemplo 4.	77
Gráfica 6.13. Acumulado reducido de casos de daño, vibración ambiental, ejemplo 4.	78
Gráfica 6.14. Elementos dañados detectados, vibración ambiental, ejemplo 4.	78
Gráfica 6.15. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 4, vibración ambiental.	79
Gráfica 6.16. Excitación forzada.	80
Gráfica 6.17. $\{\Delta P\}$ utilizando modos obtenidos con ERA vs modos analíticos, vibración forzada, ejemplo 2.	80
Gráfica 6.18. Acumulado de casos de daño, vibración forzada, ejemplo 2.	81
Gráfica 6.19. Elementos dañados detectados, vibración forzada, ejemplo 2, resultados 1 a 4.	82
Gráfica 6.20. Acumulado de casos de daño, vibración forzada, coeficiente aumentado, ejemplo 2.	83
Gráfica 6.21. Elementos dañados detectados, vibración forzada, ejemplo 2, resultado 5.	83
Gráfica 6.22. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 2, vibración forzada.	84
Gráfica 6.23. $\{\Delta P\}$ utilizando modos obtenidos con ERA vs modos analíticos, vibración forzada, ejemplo 4.	85
Gráfica 6.24. Elementos dañados detectados, vibración forzada, ejemplo 4.	86
Gráfica 6.25. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 4, vibración forzada.	86

Capítulo 1. Introducción

1.1. Identificación de daño en sistemas estructurales y mecánicos por cambios en sus características de vibración

Es importante monitorear una estructura y detectar daño en su etapa más temprana para preservar la vida y la integridad estructural (Doebbling, et al, 1996). Existen diversos métodos locales de detección de daño, siendo los más comunes: los métodos visuales, acústicos, ultrasónicos, de campo magnético, con radiografías, campos térmicos, entre otros. Estas técnicas experimentales requieren que la región del daño sea conocida con anterioridad, y que la zona dañada sea accesible. Sólo es posible detectar daño sobre o en las cercanías de la superficie. Sin embargo, no siempre se conocen las zonas dañadas en una estructura.

Determinando los cambios en las propiedades dinámicas o en la respuesta de estructuras es otra forma para la detección de daño o falla. Se basa en que los parámetros modales (frecuencias, formas modales y amortiguamiento modal) son funciones de las propiedades físicas de la estructura (masa, amortiguamiento y rigidez), las cuales sufren cambios ante la presencia de daño.

Un esquema robusto de detección de daño sería capaz de identificar que ha ocurrido daño, localizarlo, dar un estimado del daño y predecir la vida útil de la estructura. Este método podría automatizarse, el cual no debería depender del usuario o de un modelo analítico de la estructura. Más factible sería desarrollar un método que tenga las características descritas anteriormente, pero que use una medida inicial de una estructura no dañada como la base de futuras comparaciones de respuestas medidas.

Se debe tomar en cuenta las restricciones operativas y tener la habilidad de diferenciar entre las discrepancias causadas por error de modelado y discrepancias causadas por daño estructural.

1.1.1. Alcance en la detección de daño

El campo de la identificación de daño es muy amplio y engloba los métodos locales y globales. Existen muchas variables a considerar para tener éxito usando las características dinámicas de una estructura para la identificación de daño. Entre las más importantes están las consideraciones de excitación y medición, incluyendo la selección, tipo de sensores y su ubicación; además del tipo y ubicación de las excitaciones. Igualmente importante es el procesamiento de señales, el cual incluye métodos como el análisis de Fourier, el análisis tiempo-frecuencia y el análisis *Wavelet*.

Se definen cuatro niveles de identificación de daño (Rytter, 1993):

- Nivel 1: Detección de daño en la estructura.
- Nivel 2: Ubicación del daño.
- Nivel 3: Cuantificación de la severidad del daño.
- Nivel 4: Predicción de la vida útil restante de la estructura.

1.1.2. Métodos de identificación de daño

En 1996 se publicó un reporte del estado del arte sobre la detección de daño estructural (Doebbling, et al, 1996). En este reporte se presentan las técnicas de detección de daño que se tenían hasta esa fecha. En los siguientes párrafos se comenta sobre algunas de dichas técnicas.

Cambios en la frecuencia

Para identificación de daño, los cambios en las frecuencias de una estructura son utilizados debido a que se ha notado que estos son resultado de cambios en las propiedades estructurales. Sin embargo, se requiere alta precisión al tomar las mediciones ya que los cambios en las frecuencias son poco sensibles al daño. Deben tomarse mediciones sobre múltiples puntos en la estructura y así registrar modos superiores o locales si se quiere obtener información sobre la ubicación de daño.

- **El problema directo:** El cual puede caer en la categoría de identificación de daño nivel 1 (debido a que sólo puede usarse para detectar cambios globales en la estructura y no para daño localizado), consiste en el cálculo de los cambios de frecuencia de un tipo de daño conocido. Se modela el daño directamente y se comparan las frecuencias medidas experimentalmente con las frecuencias obtenidas del modelo para determinar el daño.
- **El problema inverso:** El cual cae en nivel 2 ó 3 en identificación de daño, consiste en identificar el daño al calcular los parámetros de daño (ubicación y/o magnitud de daño) a partir de los cambios en las frecuencias de vibración.

Cambios en las formas modales

Este método consiste en determinar, mediante el criterio de correlación modal (*Modal Assurance Criterion*, Miroslav Pastor, et al, 2012), el nivel de correlación entre la forma modal de la estructura real con la forma modal de la misma estructura sin daño (West, 1984). Una manera para determinar la ubicación y la magnitud del daño en los elementos, es en conjunto con cambios en las frecuencias (Rizos, et al, 1990). Este método es de nivel de detección de daño 2 ó 3.

Cuando sólo se examinan las frecuencias resonantes, las comparaciones de los cambios relativos de las formas modales son la mejor forma de detectar la ubicación del daño (Fox, 1992). No suele ser un buen indicador cuando sólo se utilizan datos experimentales (debe complementarse con datos analíticos) y lo más importante a tomar en cuenta en este método es la selección del modo a usar en el análisis (Salawu y Williams, 1994).

Cambios en la curvatura de las formas modales o formas modales de deformación

Es una alternativa más adecuada que los cambios en formas modales o frecuencias para obtener información sobre la ubicación del daño. Esto es porque un elemento dañado se deforma más que uno no dañado. Además, los cambios en la deformación son más grandes que los cambios en las frecuencias y pueden ser medidos a mayor distancia del daño (Nwosu, et al, 1995).

Se ha demostrado que el cálculo numérico de la curvatura a partir de formas modales causa grandes errores. Por esto, deben medirse en su lugar las deformaciones y calcular la curvatura a partir de ellas. Por último, el cambio en la curvatura no suele ser un buen indicador de daño cuando sólo se utilizan datos experimentales (Salawu y Williams, 1995).

La deformación es la variación de las componentes modales a lo largo de una longitud, mientras que la curvatura es la variación de la deformación a lo largo de la misma longitud.

Métodos basados en la flexibilidad medida dinámicamente

Es un método utilizado para estimar los cambios en el comportamiento estático de la estructura. El daño es detectado comparando la matriz de flexibilidad obtenida usando los modos medidos de la estructura dañada, con la matriz de flexibilidad obtenida utilizando algún método numérico.

Entre las investigaciones realizadas referentes a este método, están los trabajos de:

- Aktan, et al, en 1994 (comparación de cambios en la flexibilidad).
- Park, en 1988 (método del error de la matriz de rigidez).
- Doebling, et al, en 1995 (efectos de la flexibilidad residual).
- Peterson, et al, en 1993 (cambios en la matriz de rigidez medida)
- Entre otros.

Métodos de actualización de matrices

Este método se basa en la modificación de formas modales de la estructura para representar lo más parecido posible a la respuesta estática o dinámica medida. Para obtener información sobre el daño existente en la estructura, se realizan comparaciones de las matrices actualizadas con las matrices originales. Además, puede obtenerse información sobre la ubicación del daño y su extensión.

Entre las investigaciones realizadas referentes a este método, están los trabajos de:

- Smith y Beattie, en 1991 (métodos de actualización óptima de matrices).
- Sanayei y Onipede, et al, en 1991 (Métodos de actualización basados en sensibilidad).
- Lim, en 1994 (método de la asignación de estructuras características).
- Entre otros.

1.1.3. Identificación de daño aplicada a estructuras específicas

Armaduras

Se ha encontrado que en las armaduras el daño es más evidente en los cambios de las frecuencias de vibrar que en los cambios en las formas modales (Smith y McGowan, 1989).

Cuando se utilizan métodos modales, la detección de daño es factible para miembros que contribuyen significativamente a la energía de deformación de los modos medidos (Kashangaki, et al, 1992).

En el caso de los métodos de flexibilidad medida dinámicamente, es importante el poder distinguir los grados de libertad rotacionales cuando los cambios estructurales se presentan principalmente en el comportamiento global a flexión (Peterson, et al, 1993).

Si se presentan un número limitado de grados de libertad instrumentados, se puede utilizar una técnica basada en la asignación de una estructura característica (métodos de actualización de matrices), la cual provee buenos resultados (Lim, 1994-1995).

Puentes

Los puentes suelen ser inspeccionados principalmente mediante técnicas visuales, en las cuales no siempre puede detectarse el daño, además de que este puede crecer dramáticamente entre los intervalos de inspección. Es apropiado utilizar mecanismos de detección de daño en tiempo real en algunos tipos de puentes (aquellos con poca redundancia estructural) y así poder llevar a cabo las acciones correspondientes a su debido tiempo.

Los cambios en la rigidez y en la impedancia mecánica pueden usarse como indicadores de deterioro por fatiga (Salane, et al, 1981).

La respuesta dinámica de puentes con tráfico puede utilizarse para determinar las frecuencias naturales y detectar posibles daños en tiempo real (Turner y Pretlove, 1988).

La degradación estructural puede causar cambios significativos en las frecuencias naturales y en las formas modales, los cuales son mayores mientras más cerca del daño se tome la medición (Mazurek y DeWolf, 1990).

Los cambios en las formas modales son más sensibles al daño que las frecuencias. Sin embargo, cuando se utiliza el criterio de correlación modal (MAC), no pueden utilizarse para ubicar el daño (Alampalli, et al, 1995). Además, no pueden detectar daño cuando éste se encuentra en etapas tempranas (Farrar y Cone, 1995).

Si se usa algún método de sensibilidad (los cuales caen dentro de los métodos de actualización de matrices), se pueden identificar las zonas de rigidez reducida en el puente, y así, ubicar los elementos dañados (Law, et al, 1992).

Marcos

Entezami y Shariatmadar (2014) presentan un estudio de estructuras de cortante, donde concluyen que los cambios en las frecuencias y formas modales pueden utilizarse en procedimientos de actualización de matrices, e identificar la presencia de daño (o múltiple daño) y su ubicación. Sin embargo, es necesario determinar correctamente la información inicial del modelo estructural.

Chang y Lee (1992) indican que los cambios en las formas modales pueden utilizarse para detectar daño en la estructura. Para ubicar el daño deben utilizarse cambios en las formas modales de deformación, ya que son más sensibles ante los cambios en las propiedades estructurales.

Hearn y Testa (1991) comprueban que cambios en las frecuencias naturales y en el amortiguamiento modal pueden indicar daño. Encontraron que en los casos en el que un parámetro no pueda indicar daño, el otro sí podría indicarlo. Para el caso de los cambios en las formas modales, son indicadores pobres cuando el daño es pequeño. En cualquier análisis modal, los elementos dañados sólo afectarán aquellos modos en los que el elemento participa. La magnitud en la que son afectados los modos depende de la magnitud de la energía potencial que el elemento dañado proporciona al mismo. En estructuras grandes, el uso de los cambios en las formas modales globales no suele proveer buena información sobre la ubicación del daño, ya que cada elemento proporciona una pequeña parte de la energía potencial de cada modo. En estos casos, el uso de los cambios en las formas modales locales provén mejor información acerca del daño.

Shi y Law (1998) comentan que otra forma de detectar y localizar daño es utilizando cambios en los modos de energía de deformación. Estos cambios son mayores en los elementos dañados y decrece conforme a la distancia a la que se encuentra cada elemento al dañado. Esto es válido tanto en daño en un solo elemento como en daño múltiple. Para realizar este método de detección, sólo se necesita conocer las matrices de rigidez y las formas modales analíticas de la estructura.

1.1.4. Problemas en la identificación de daño

Algunos de los principales problemas que se han presentado en la identificación de daño son los siguientes:

- La dependencia de un modelo analítico o de pruebas experimentales para detectar y localizar el daño y de la dificultad de poder obtener esta información.
- El impedimento de algunos métodos de considerar el comportamiento no lineal de la estructura debido al daño.
- La cantidad y ubicación de los sensores para tomar las medidas.
- El nivel de sensibilidad que ofrecen los parámetros modales ante bajos niveles de daño, ya que sólo se ha demostrado para estructuras específicas.
- El conocimiento necesario para poder utilizar vibraciones inducidas por condiciones ambientales.

1.2. Objetivos de la tesis

Los objetivos generales y particulares son los siguientes:

1.2.1. General

Proponer un método para detectar la presencia de daño, su ubicación y magnitud. Este método deberá poder realizar lo anterior al utilizar datos experimentales.

1.2.2. Particulares

Realizar un estudio paramétrico de uno o más indicadores de daño.

Aplicar la metodología propuesta analíticamente en un modelo estructural ante distintos escenarios de daño.

Aplicar la metodología utilizando datos generados en una simulación experimental.

1.3. Estructura de la tesis

En el capítulo 2 se discute sobre cómo se considera que se genera el daño en una estructura, cómo afecta sus propiedades dinámicas y cómo se modela en los análisis realizados. Además, se define el indicador de daño utilizado, con el cual, se calcula el parámetro de daño considerado.

En el capítulo 3 se mencionan las consideraciones que se tomaron para realizar los modelados numéricos. Conjuntamente, se realiza un análisis de sensibilidad para determinar qué nivel de discretización de los elementos estructurales se utiliza en los siguientes análisis.

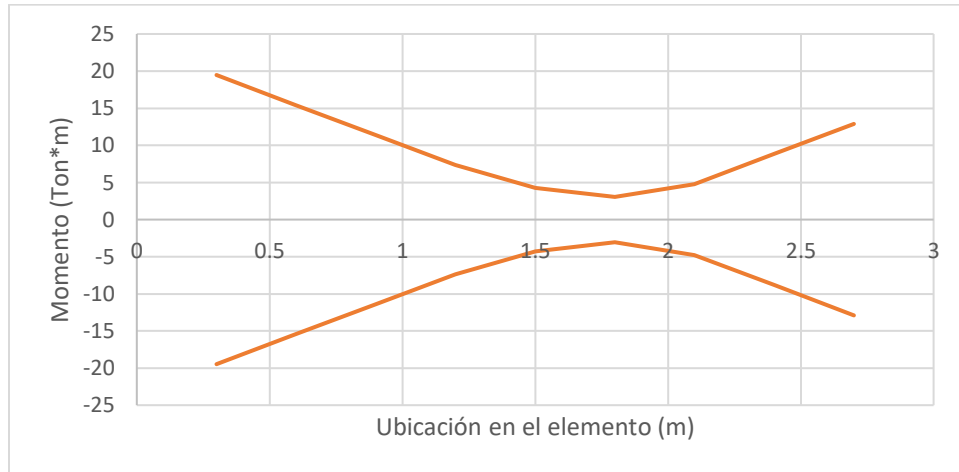
En el capítulo 4 se realiza un análisis paramétrico, en el cual se busca la forma en la que se comporta dicho parámetro ante distintos escenarios de casos de unidano (presencia de sólo un caso de daño). De igual forma, se encuentra una relación entre los casos de unidano con los casos de multidano (múltiple presencia de casos de daño). Esto último es la base con la cual se propone la metodología de detección de daño.

En el capítulo 5, con base en los resultados obtenidos del capítulo 4, se propone una metodología para la detección de daño estructural. Además, la metodología se aplica a 4 ejemplos diferentes.

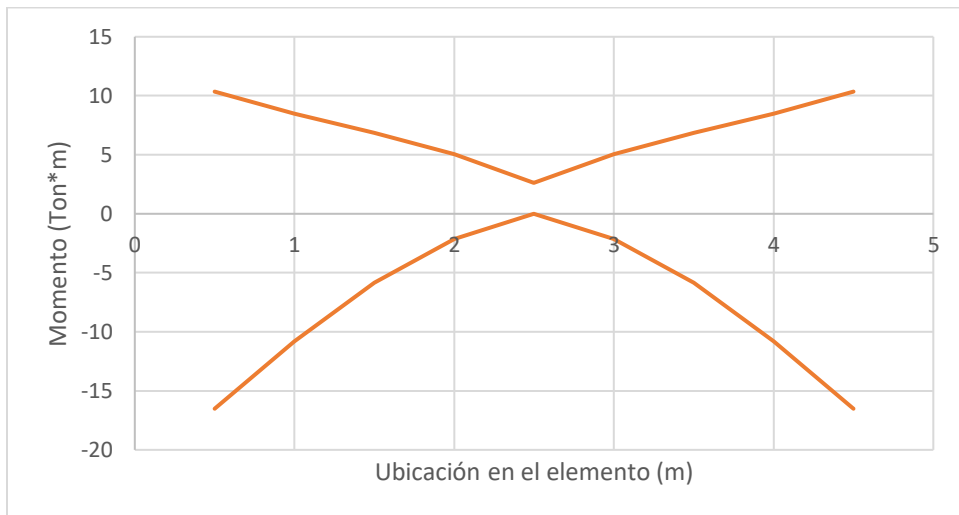
En el capítulo 6 se realiza una simulación experimental, en la que se obtienen las propiedades dinámicas de una estructura a partir de métodos desarrollados para obtenerlas al utilizar datos experimentales. Entonces, se aplica la metodología de detección de daño con tales propiedades.

Capítulo 2. El daño en las estructuras

La aparición de daño en elementos estructurales suele generarse mientras la estructura está sometida a eventos extraordinarios tales como sismos, vientos fuertes, etc. En cualquier otro caso las estructuras están diseñadas para resistir las condiciones de servicio sin que sus elementos presenten niveles de daño importantes. Durante estos eventos extraordinarios es cuando los elementos estructurales están sujetos a mayores demandas. En la gráfica 2.1 y la gráfica 2.2 se muestran los momentos envolventes de un grupo de columnas y un grupo de vigas, respectivamente, en las cuales existen zonas infinitamente rígidas en sus extremos, cuando un edificio está sometido a cargas sísmicas, las cuales se maximizan en sus extremos:



Gráfica 2.1. Diagrama típico de momentos envolvente de columnas.



Gráfica 2.2. Diagrama típico de momentos envolvente de vigas.

La existencia de daño puede traducirse en degradación de la sección transversal del elemento en la zona dañada, la cual, de acuerdo a las gráficas anteriores, se presenta en los extremos de los elementos. La posible degradación de la sección transversal afecta directamente a la rigidez del elemento.

2.1. Cambios en las propiedades dinámicas

Ya que la existencia de daño en una estructura afecta su rigidez, de igual forma lo hará con sus propiedades dinámicas, las cuales pueden ser medibles.

Para el caso de un sistema de un grado de libertad, el periodo natural de vibrar se calcula con la expresión:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad \text{ec. 1}$$

Lo que implica que una reducción de la rigidez (K) del sistema, suponiendo que su masa (M) permanece constante, incrementa su periodo de vibrar (T). Por lo tanto, hará lo mismo para sistemas de múltiples grados de libertad, principalmente para aquellos modos en los que el elemento dañado tiene una mayor participación. Además, ya que el cálculo de formas modales (ϕ) de un sistema de múltiples grados de libertad también depende de su rigidez, estas también cambiarán con la presencia de daño en el sistema. Tales formas modales se calculan al resolver el siguiente problema de valores y vectores característicos:

$$\{\phi\} * \left([K] - \left\{ \frac{4\pi^2}{T^2} \right\} * [M] \right) = 0 \quad \text{ec. 2}$$

Los modos de vibrar determinan la forma en la que una estructura se deforma al excitarla ante una de sus frecuencias naturales.

2.2. Parámetro de daño

Dado lo anterior, la energía potencial (o energía de deformación modal) que desarrolla cada elemento de la estructura en cada modo de vibrar puede ser indicativo de daño. La cual se calcula a partir de la siguiente ecuación (Hearn y Testa, 1991):

$$Ep_{i,j} = \phi_{i,j}^T * K_i * \phi_{i,j} \quad \text{ec. 3}$$

donde:

- $Ep_{i,j}$ = Energía potencial modal que desarrolla el elemento “i” en la forma modal “j”.
- $\phi_{i,j}$ = Forma modal local “j” correspondiente al elemento “i”.
- K_i = Matriz de rigidez del elemento “i”.

Una vez calculada la energía que desarrollan “n” elementos de interés para “m” formas modales, se calcula la energía total como la suma de la energía de desarrolla cada elemento. Luego, la energía que desarrolla cada uno se normaliza con respecto a la energía total.

$$E_{pt} = \sum_i^n \sum_j^m E_{p_{i,j}} \quad \text{ec. 4}$$

$$\hat{E}p_i = \frac{\sum_j^m E_{p_{i,j}}}{E_{pt}} \quad \text{ec. 5}$$

donde:

- n = Número de elementos.
- m = Número de formas modales.
- E_{pt} = Energía potencial total.
- $\hat{E}p_i$ = Energía potencial normalizada del elemento “i”.

Esta energía potencial puede calcularse tanto para el estado no dañado (u) como para el estado dañado (d).

Entonces, el parámetro de daño a tomar en cuenta para realizar los análisis de detección de daño se calcula de la siguiente forma:

$$\Delta P_i = \frac{\hat{E}p_i^d - \hat{E}p_i^u}{\hat{E}p_i^u} \quad \text{ec. 6}$$

donde:

- ΔP_i es el incremento de energía potencial normalizado del elemento “i”.
- “u” y “d” corresponden a los estados sin daño y con daño, respectivamente.

Un elemento se deforma más al presentar daño que sin presentarlo. Por esto, la energía potencial de tal elemento es mayor en el estado dañado que en el estado sin daño.

Capítulo 3. Consideraciones para el modelado y análisis numérico

Para el modelado numérico se utilizará el método de las rigideces, el cual considera que la estructura está conformada de elementos discretos, con sus masas concentradas en sus nodos. Esta discretización puede traer consigo errores en el cálculo de las propiedades dinámicas, ya que en la realidad tanto la masa como la rigidez de sus elementos es distribuida (Figura 1). Todos los análisis realizados fueron elásticos.

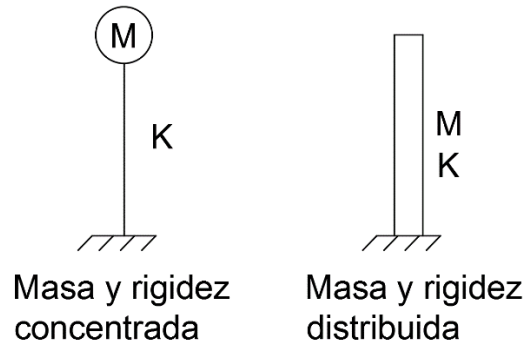


Figura 1. Sistema discreto y sistema continuo.

Por tanto, para el modelado numérico se considera a cada elemento como una subestructura, que está conformada de “n” elementos (Figura 2):

- 1 sub-elemento en cada extremo del elemento “i” modelado con rigidez “infinita” (K_∞) para considerar el efecto de las zonas rígidas (de longitud “a” o “b”).
- 1 sub-elemento adyacentes al sub-elemento rígido en cada extremo para modelar la zona dañada del elemento “i”, independiente en cada conexión (rigidez K_o y K_d y longitud “ l_o ” y “ l_d ”).
- “m” sub-elementos modelados con la rigidez definida para el elemento “i” para considerar el efecto de la rigidez distribuida (K_i y longitud L'/m).
- Las masas de cada sub-elemento se concentran en sus nodos para considerar el efecto de la masa distribuida.

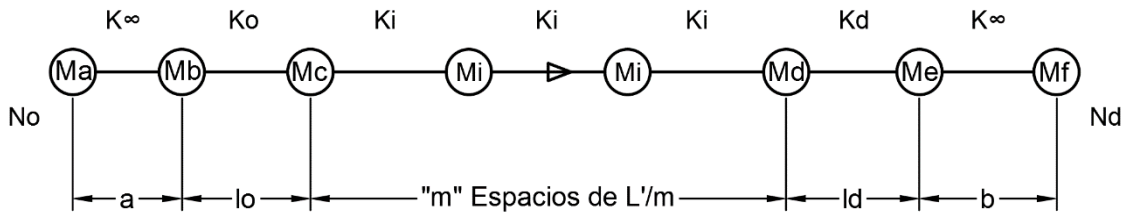


Figura 2. Sub-estructuración del elemento “i”.

3.1. Análisis de sensibilidad del comportamiento dinámico

Se procede a realizar un análisis de sensibilidad, con el motivo de encontrar el nivel de discretización en el cual las propiedades dinámicas convergen. Este análisis consiste en la variación del nivel de discretización de los elementos para obtener los periodos naturales de una estructura (Figura 3). Los datos utilizados para el modelado de la estructura son los siguientes:

- Columnas de 60x90cm (lado largo orientado paralelamente al eje Y) y vigas de 30x60cm.
- Módulo de elasticidad de 221,359.4 kg/cm² y relación de Poisson de 0.2.
- Peso volumétrico de 2.4 ton/m³.
- Los apoyos están restringidos en todos los grados de libertad.
- Longitudes de zonas rígidas definidas por las dimensiones transversales de los elementos conectados en cada nodo.
- No se considera la existencia de diafragma rígido.

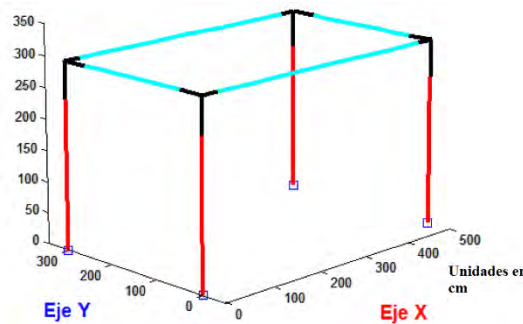
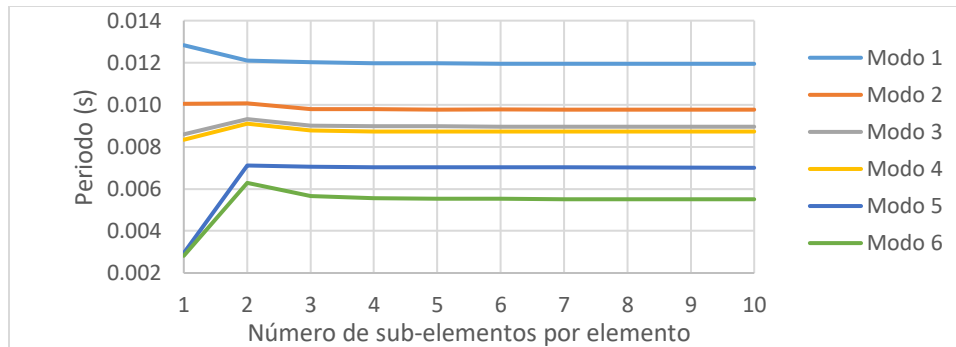


Figura 3. Estructura de prueba para análisis de sensibilidad.

Los resultados obtenidos de dicho análisis se presentan en la gráfica 3.1.



Gráfica 3.1. Convergencia de los periodos de vibrar respecto al nivel de discretización.

De acuerdo con la gráfica 3.1, se observa que a partir de utilizar un nivel de discretización de 4 sub-elementos, los primeros 6 modos de vibrar convergen (2 horizontales en cada dirección y 2 torsionales). Por lo tanto, se utiliza este nivel de discretización en los siguientes análisis.

Capítulo 4. Análisis paramétrico

4.1. Modelo de tres niveles

Para el análisis paramétrico se propone analizar la estructura mostrada en la figura 4. Los datos utilizados son los mismos que aquellos utilizados en el análisis de sensibilidad.

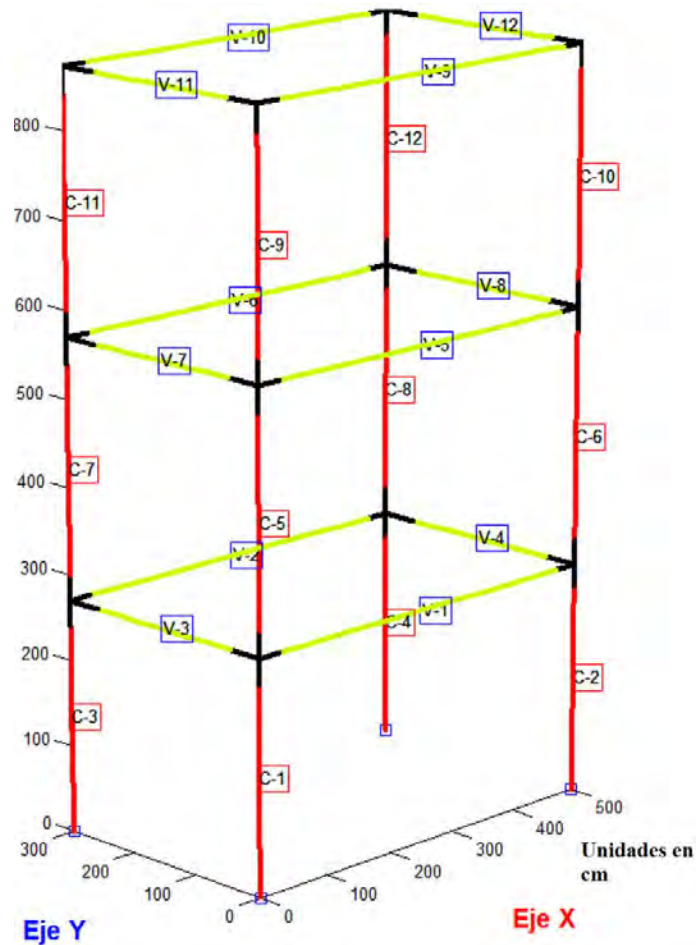


Figura 4. Modelo de tres niveles.

Se consideraron 6 casos de daño:

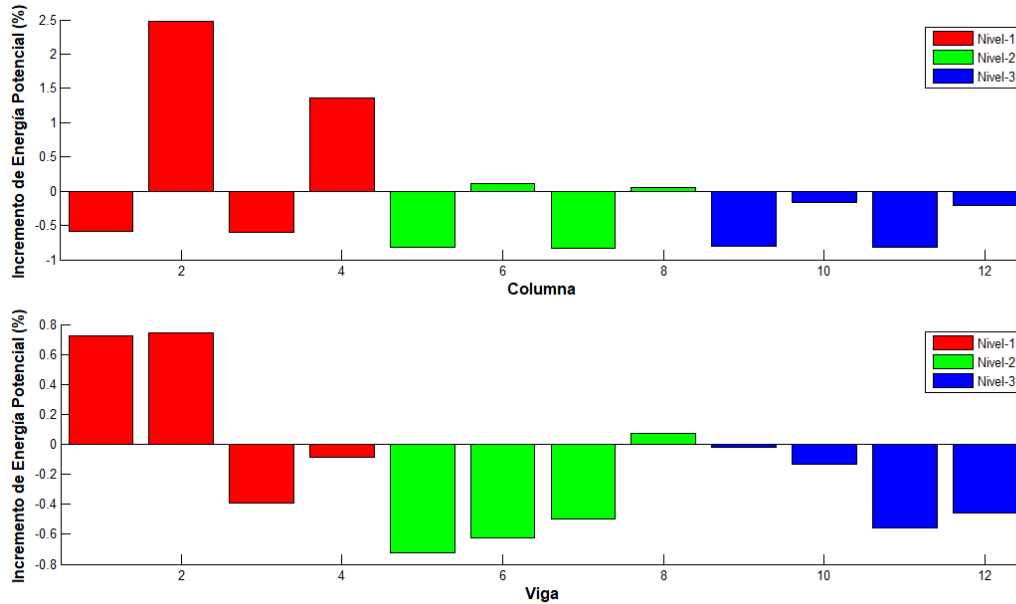
- En el nodo inferior de la columna C-2.
- En el nodo superior de la columna C-2.
- En el nodo inferior de la columna C-6.
- En el nodo superior de la columna C-6.
- En el nodo inferior de la columna C-10.
- En el nodo superior de la columna C-10.

En todos los casos de daño se considera una degradación del momento de inercia con respecto al eje X, con una longitud dañada correspondiente al 5% de la longitud de las columnas. Sólo se utilizaron los dos primeros modos de vibrar en cada dirección (2 modos de traslación horizontal y 2 modos rotacionales sobre el eje vertical, que corresponden a una participación del 87% de la respuesta dinámica).

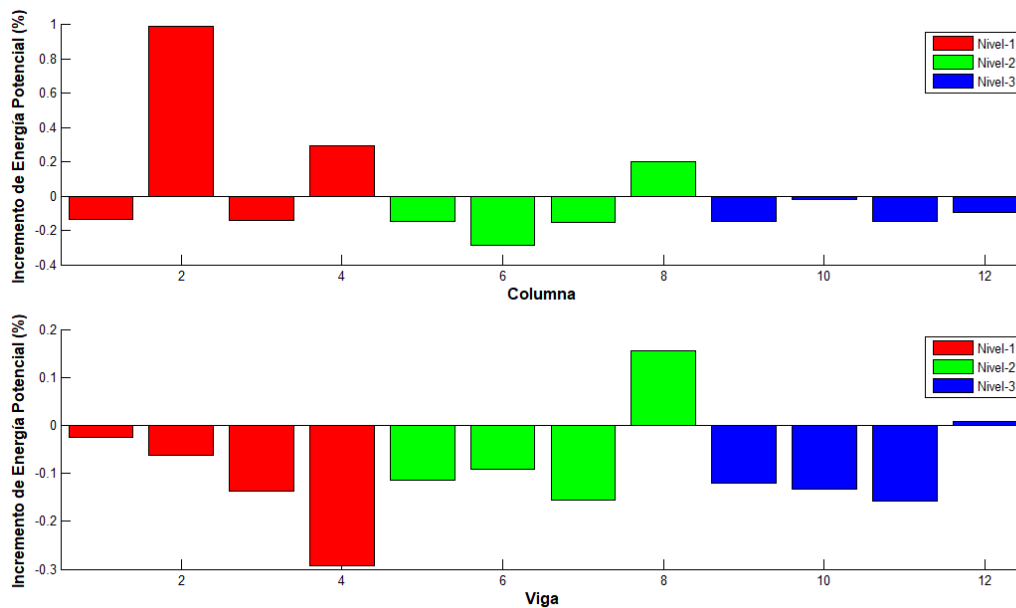
4.1.1. Análisis con formas modales completas

Inicialmente se realiza el análisis con todas las componentes de las formas modales (sólo nodos origen y destino de los elementos) y una degradación del 10% del momento de inercia (este tipo de daño corresponde a articulaciones plásticas). Al simular cada caso de daño y al capturar el cambio de energía que desarrolla cada columna se tiene:

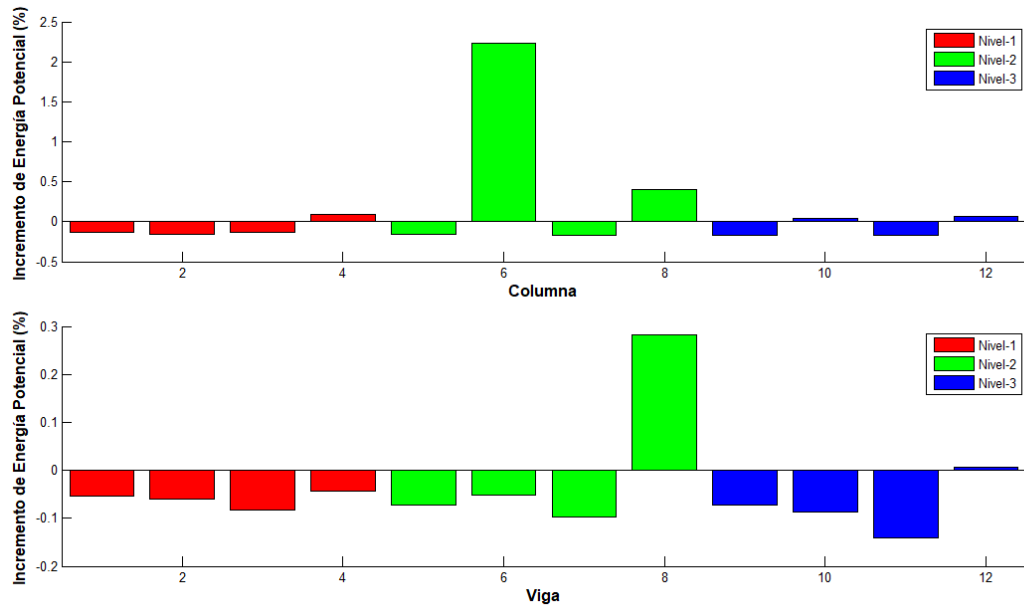
4.1.1.1. Unidaño



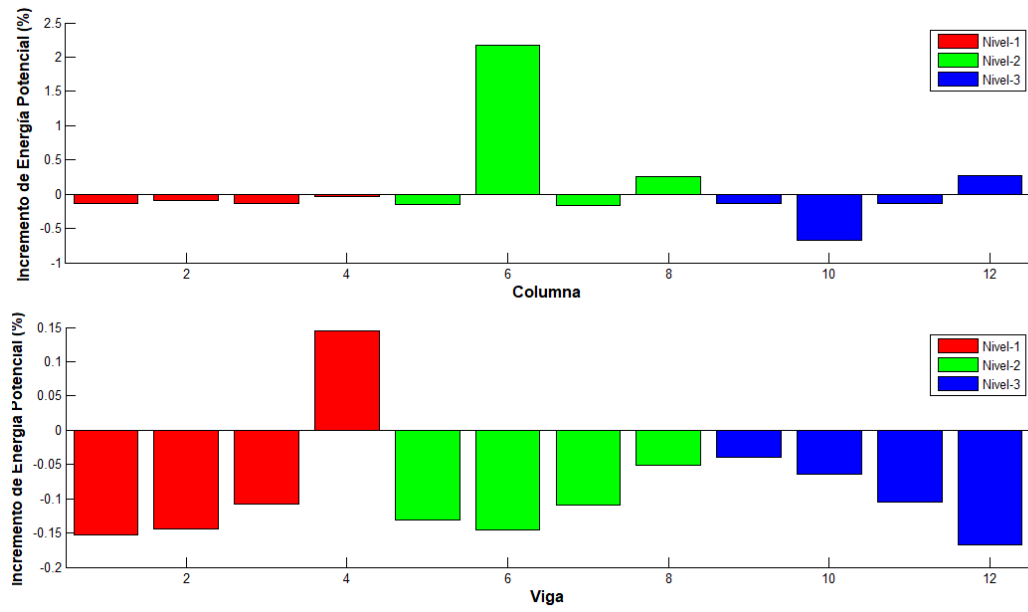
Gráfica 4.1. Análisis paramétrico, daño en nodo inferior de C-2.



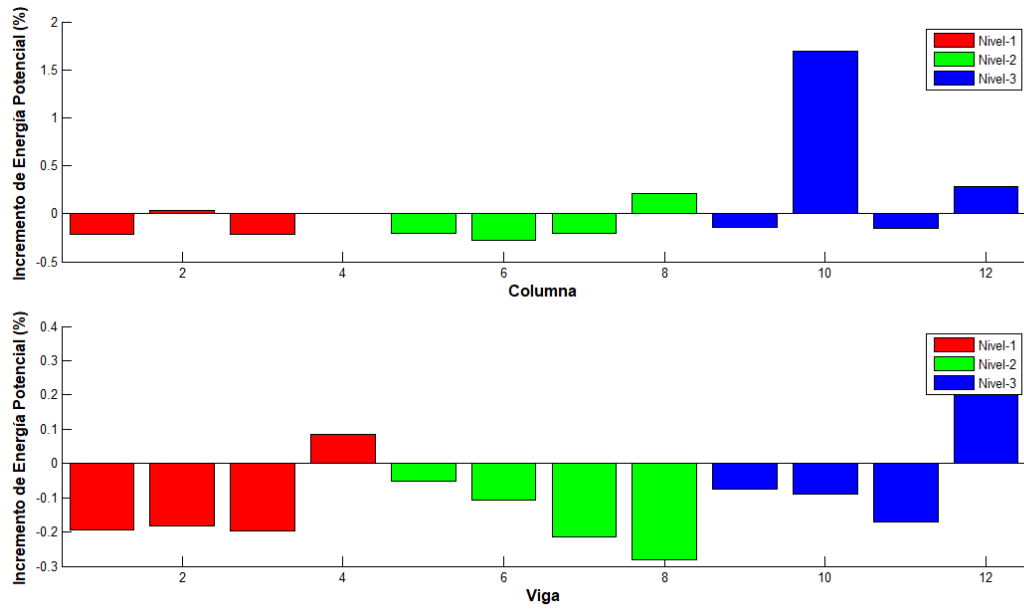
Gráfica 4.2. Análisis paramétrico, daño en nodo superior de C-2.



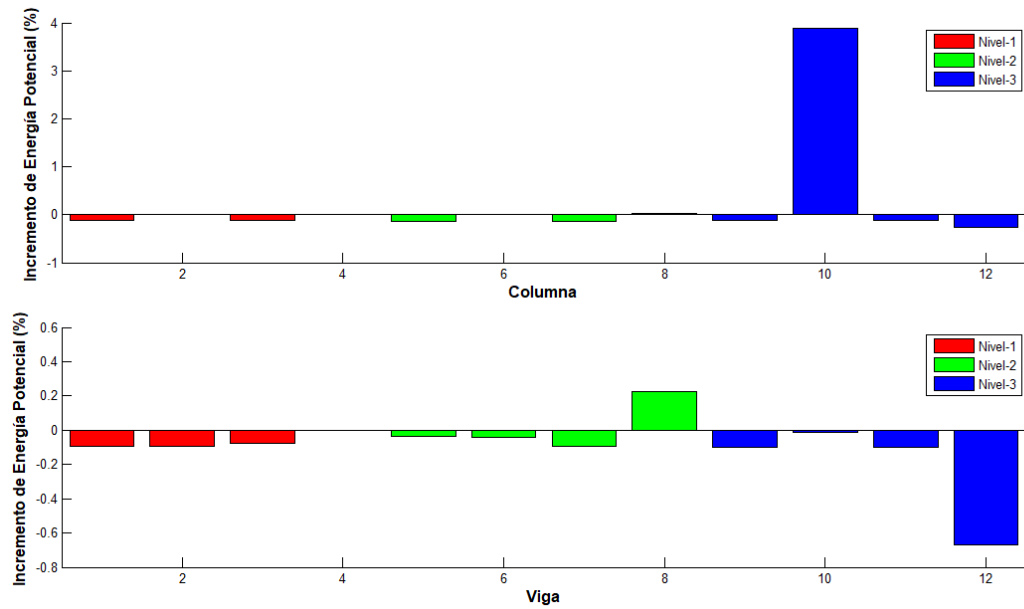
Gráfica 4.3. Análisis paramétrico, daño en nodo inferior de C-6.



Gráfica 4.4. Análisis paramétrico, daño en nodo superior de C-6.



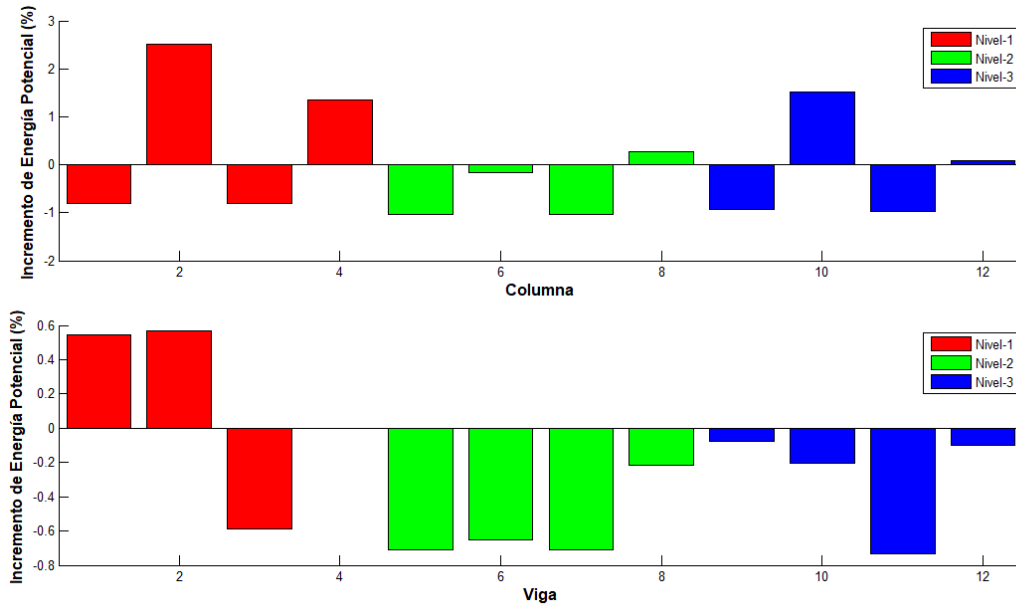
Gráfica 4.5. Análisis paramétrico, daño en nodo inferior de C-10.



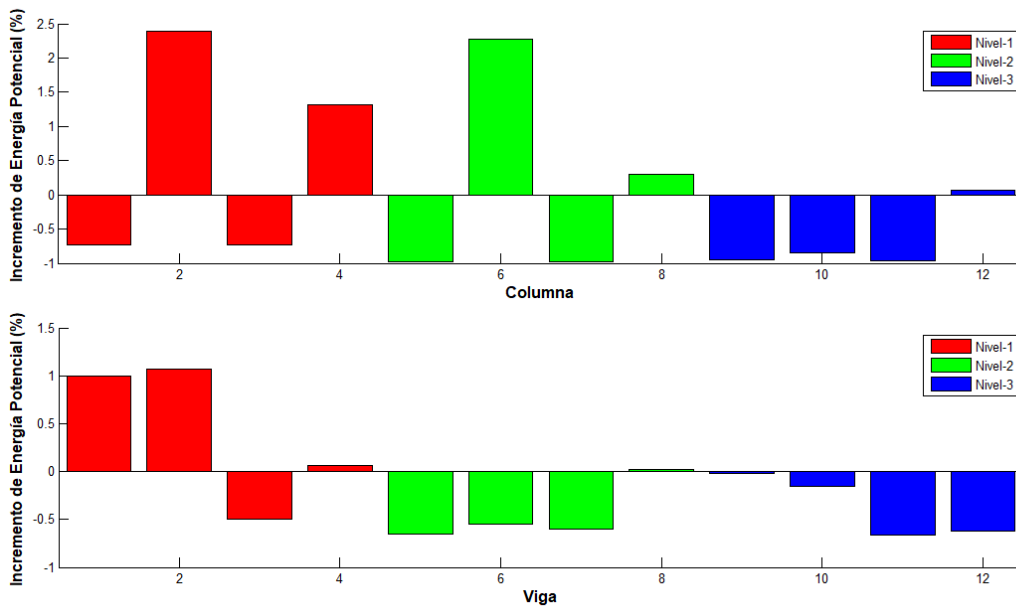
Gráfica 4.6. Análisis paramétrico, daño en nodo superior de C-10.

4.1.1.2. Multidaño

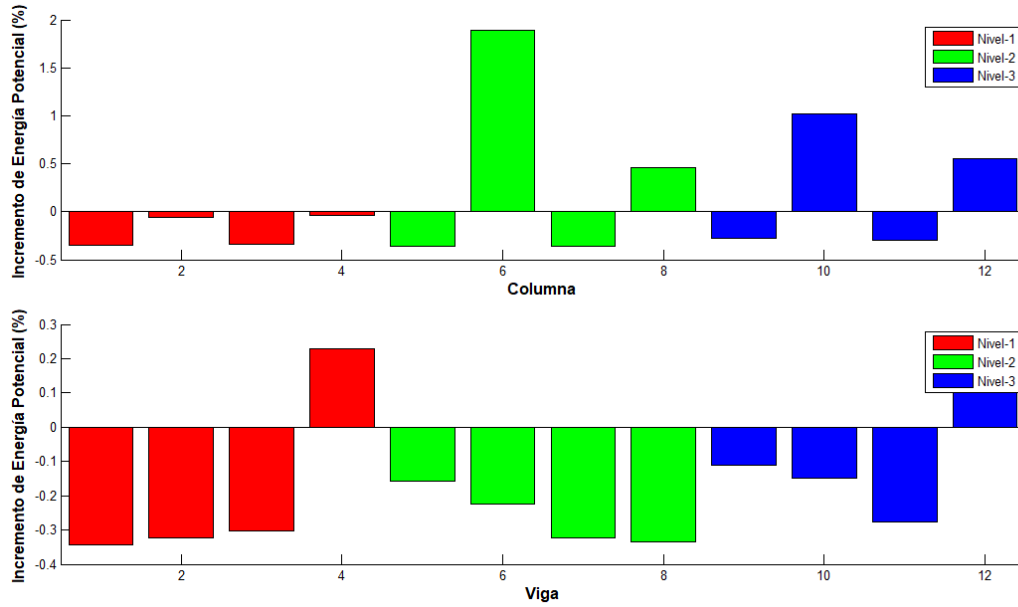
Para los casos de multidaño (presencia de múltiples casos de daño simultáneos), se modelan distintas combinaciones de casos de daño. Los resultados se presentan a continuación.



Gráfica 4.7. Análisis paramétrico, casos de daño a) + e).



Gráfica 4.8. Análisis paramétrico, casos de daño a) + d).



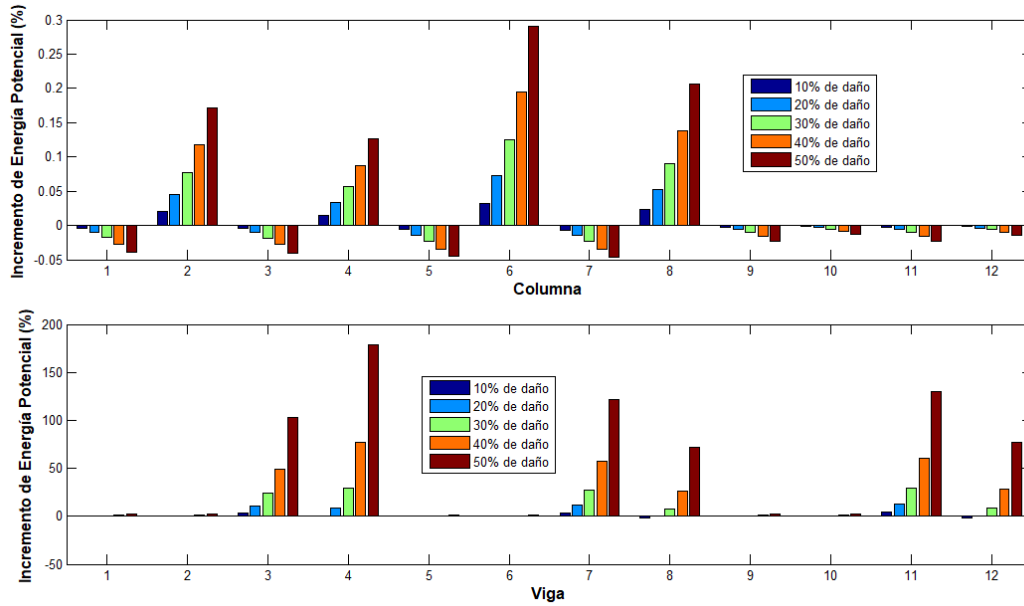
Gráfica 4.9. Análisis paramétrico, casos de daño d) + e).

De la gráfica 4.1 a la gráfica 4.9 puede observarse que en todos los casos, los elementos que resultan con mayor incremento en la energía potencial desarrollada coinciden con los elementos dañados. Además, el número de falsos positivos (elementos diferentes al dañado con componentes positivas de incremento de energía) es bajo y con un incremento mínimo en la energía potencial.

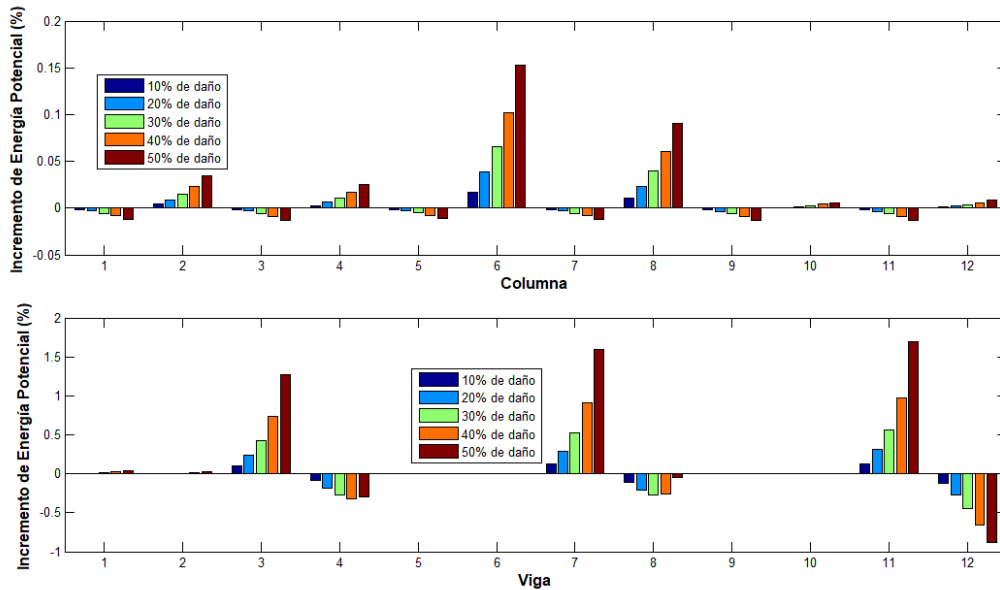
4.1.2. Análisis con formas modales incompletas

Ya que en la realidad se tienen muchas limitaciones con respecto a la instrumentación de estructuras (los sensores están limitados a medir un cierto tipo de movimiento), se realiza el análisis de detección de daño únicamente con las componentes de traslación horizontal de las formas modales (sólo nodos origen y destino de los elementos). En este análisis, se consideran degradaciones del momento de inercia desde el 10% hasta el 50%.

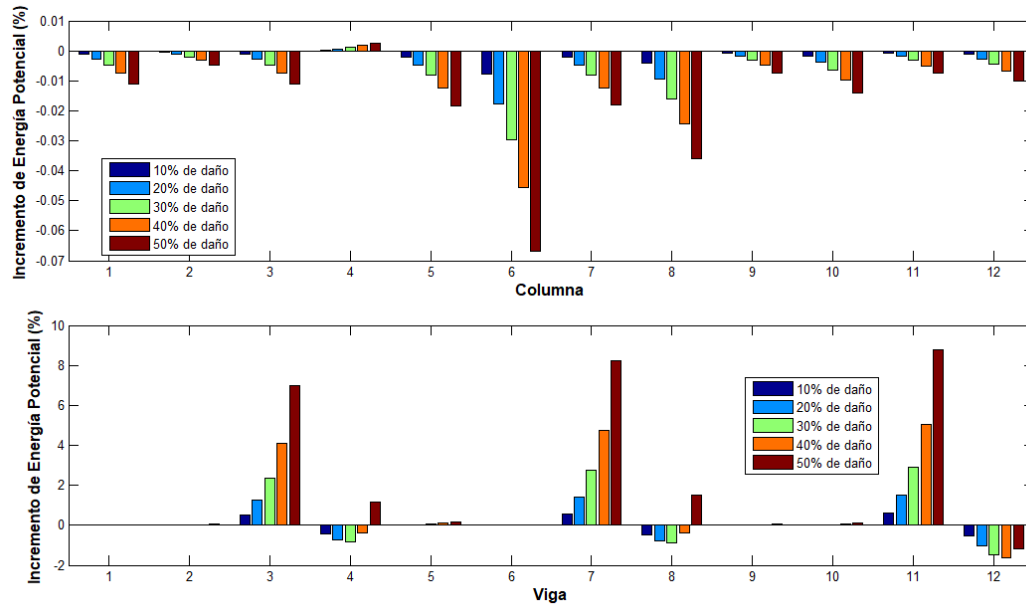
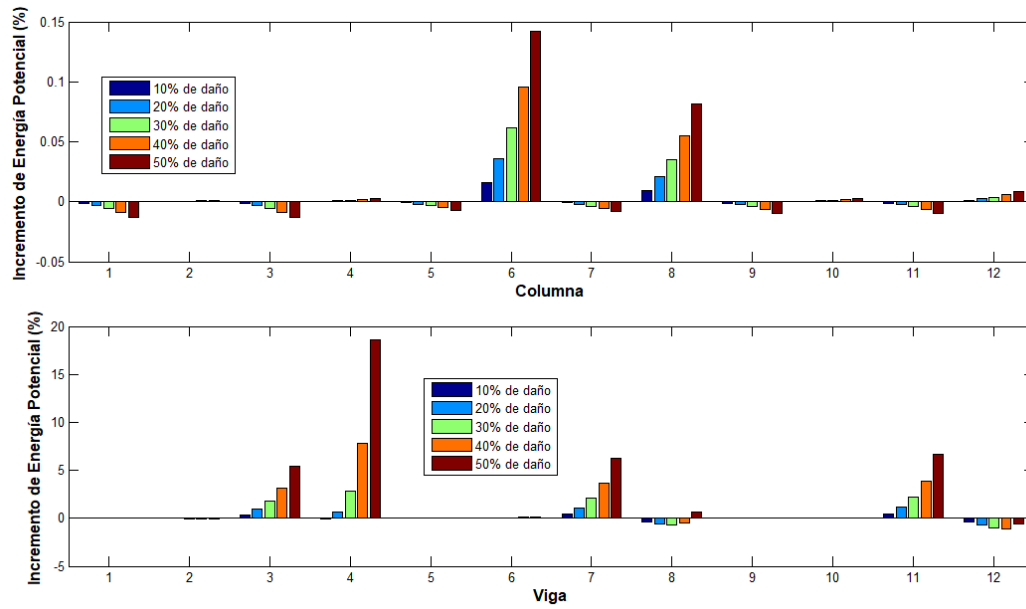
4.1.2.1. Unidario

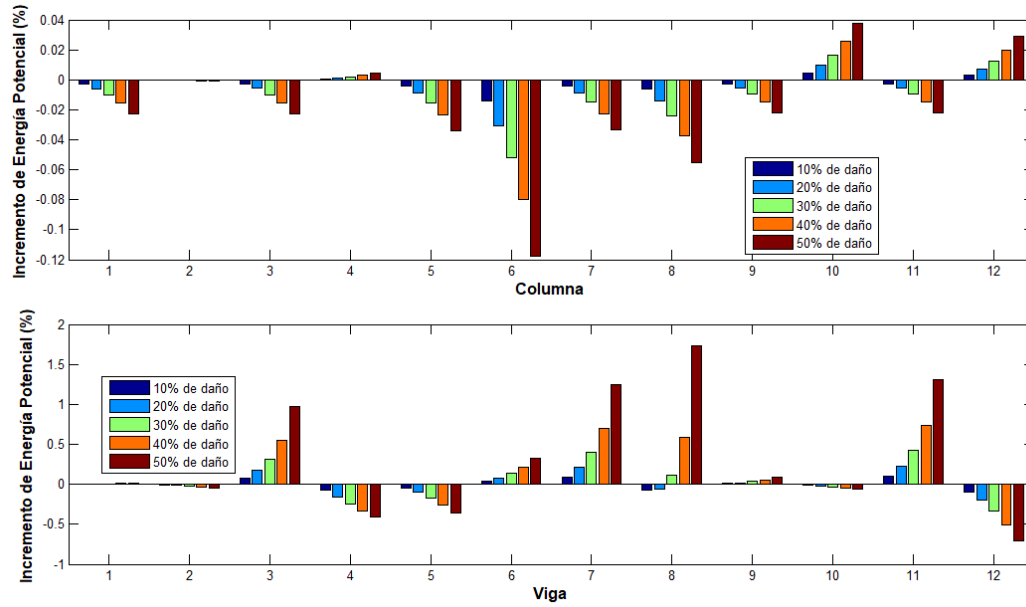


Gráfica 4.10. Análisis paramétrico, caso de daño a), modos incompletos.

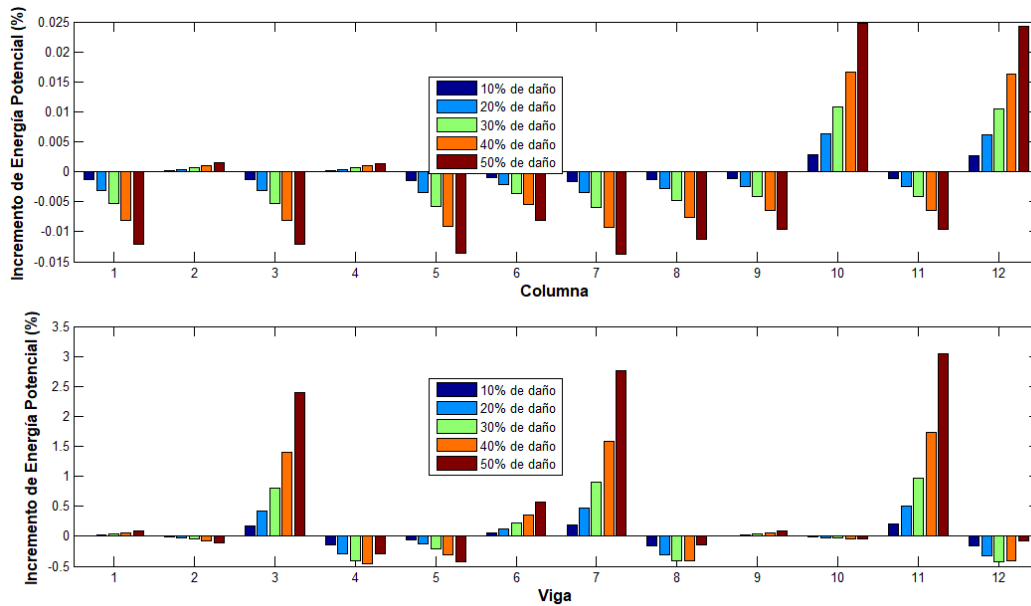


Gráfica 4.11. Análisis paramétrico, caso de daño b), modos incompletos.





Gráfica 4.14. Análisis paramétrico, caso de daño e), modos incompletos.

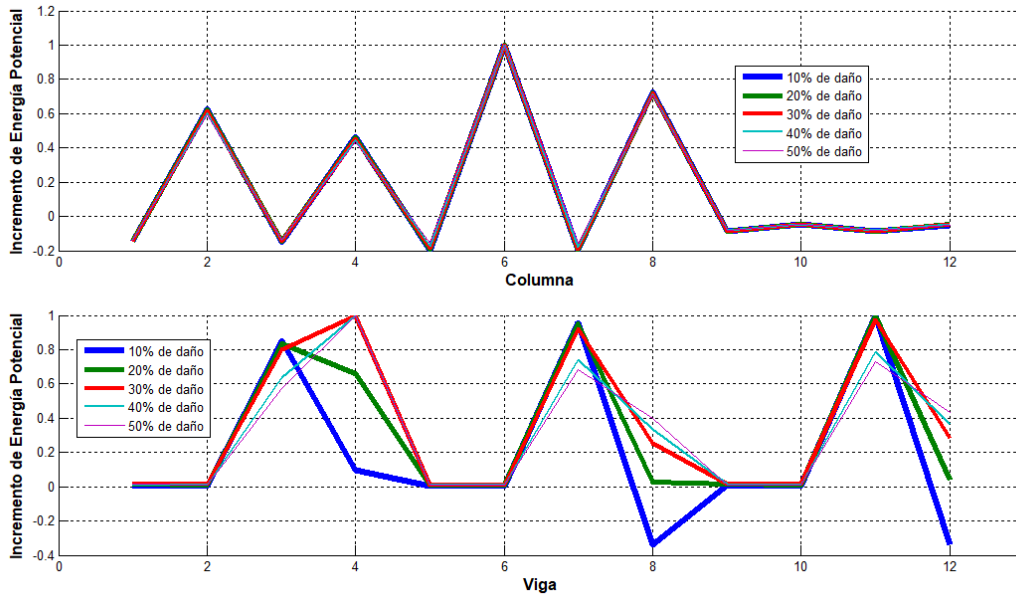


Gráfica 4.15. Análisis paramétrico, caso de daño f), modos incompletos.

De la gráfica 4.10 a la gráfica 4.15 se observa un incremento de falsos positivos. Especialmente en el caso de daño a), donde el elemento con mayor incremento de energía potencial no coincide con el elemento dañado. No es posible definir los elementos dañados sólo al observar el incremento de energía que desarrollan.

La razón por la que estos resultados no concuerdan con los del capítulo 4.1.1, es porque en estos últimos sólo se consideran desplazamientos horizontales (se induce más o menos deformación en algunos elementos que al considerar todos los grados de libertad).

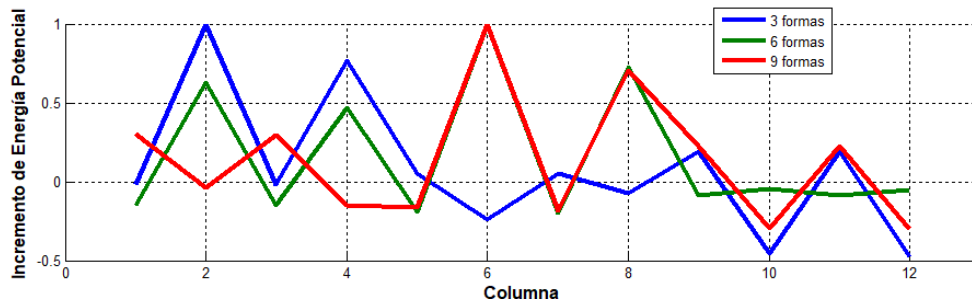
Al graficar el patrón de incremento de energía potencial (vectores normalizados con respecto a su máxima amplitud, respectivamente) del caso de daño a), se tiene la gráfica 4.16.



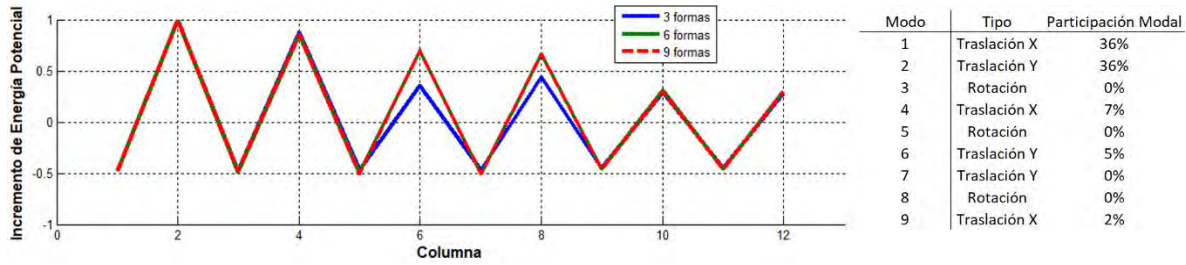
Gráfica 4.16. Variabilidad del patrón de daño ante distinto nivel de daño.

El patrón de daño resulta ser casi invariante (el coeficiente de correlación mínimo entre patrones de daño es de 0.9997) ante el nivel de daño presente, esto es únicamente para el caso de la energía desarrollada en las columnas.

Al realizar el análisis paramétrico del caso de daño a), multiplicando la contribución de energía de cada forma modal por su factor de participación modal (del caso sin daño) y variando el número de formas utilizadas se obtiene la gráfica 4.17 y la gráfica 4.18.



Gráfica 4.17. Patrón de daño sin afectar por factor de participación modal.



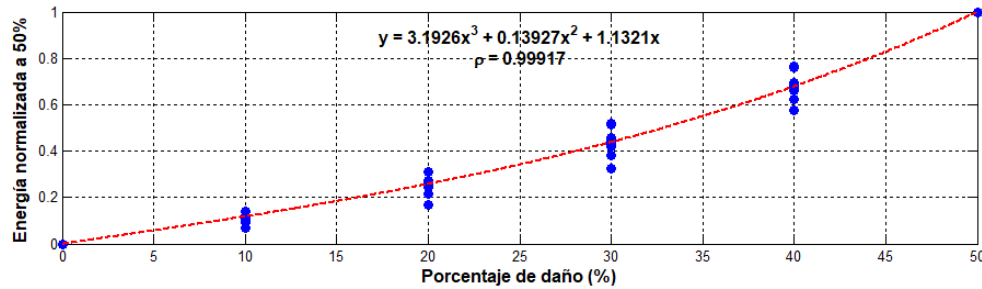
Gráfica 4.18. Patrón de daño afectado por factor de participación modal.

De la gráfica 4.17 y la gráfica 4.18 se observa que el uso del factor de participación modal ayuda a eliminar falsos positivos. Además, hace que el patrón de energía potencial converja a uno en particular, eliminando la incertidumbre de cuantos modos utilizar para el análisis. En este caso, los modos rotacionales no participan debido a la simetría de la estructura.

En los siguientes análisis a realizar, la energía potencial calculada se afecta por los factores de participación modal.

4.1.2.2. Análisis de daño incremental

Al graficar el incremento de energía potencial que desarrolla cada columna (las vigas no debido a la variabilidad de su patrón de daño, ver gráfica 4.16) en cada nivel de daño normalizado con respecto al daño del 50% (de todos los casos de daño considerados) y realizar una regresión polinomial de los datos se obtiene la gráfica 4.19. En esta gráfica, cada punto representa la energía normalizada a 50% que desarrolla cada columna a cada nivel de daño.



Gráfica 4.19. Análisis de daño incremental, modelo de tres niveles.

donde:

- y = Energía normalizada al 50%.
- x = Porcentaje de daño.
- ρ = Coeficiente de correlación entre los datos y la curva ajustada.

El incremento de energía potencial que desarrollan los elementos de toda la estructura aumenta de forma polinomial al incremento del daño que presentan.

4.2. Modelo de 7 niveles

Para el siguiente análisis del parámetro de daño, se propone realizarlo sobre una estructura de mayor redundancia (debido a que en la realidad los métodos de detección de daño serían más solicitados en estructuras complejas, debido a su dificultad de encontrar el daño visualmente), la cual se muestra en la figura 5 (se agregó una crujía en cada dirección, además de 4 niveles adicionales). Los datos utilizados son los mismos que en el modelo de tres niveles. En este modelo se simula la presencia del diafragma al multiplicar el momento de inercia en Y y el momento polar de las vigas en 10,000.

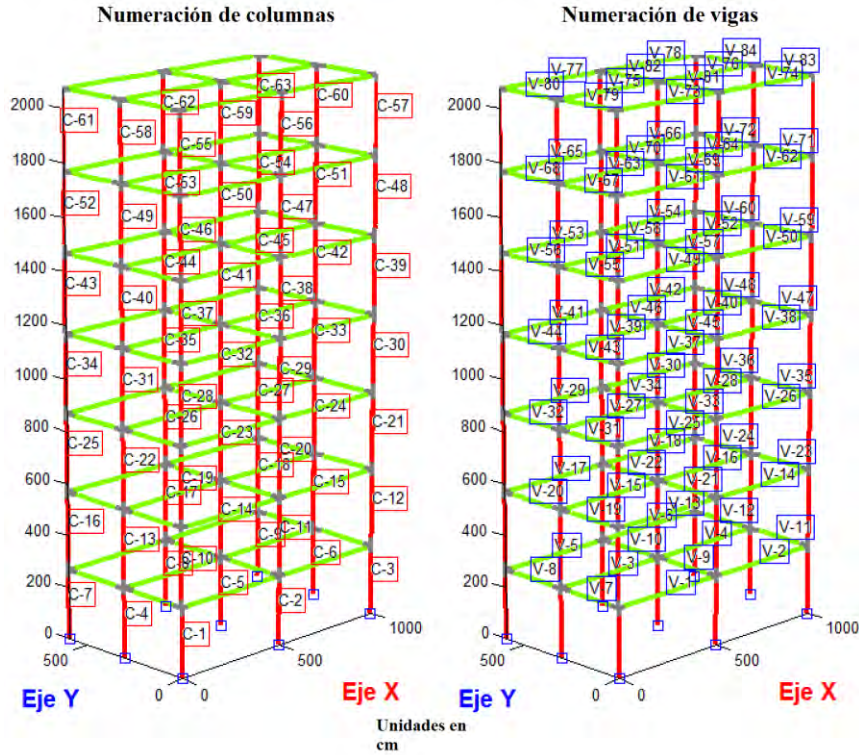


Figura 5. Modelo de 7 niveles.

Tabla 1. Propiedades dinámicas del modelo de 7 niveles.

Propiedades Modales		
Modo y dirección	Periodo (s)	Factor de participación
1x	0.12	38%
1y	0.09	37%
2x	0.04	5%
2y	0.03	7%
3y	0.02	2%
3x	0.01	2%
Suma=		91%

Los casos de daño a modelar son los siguientes:

- a) Daño en columnas ubicadas en B-2 en cada nivel (columnas 5, 14, 23, 32, 41, 50 y 49).

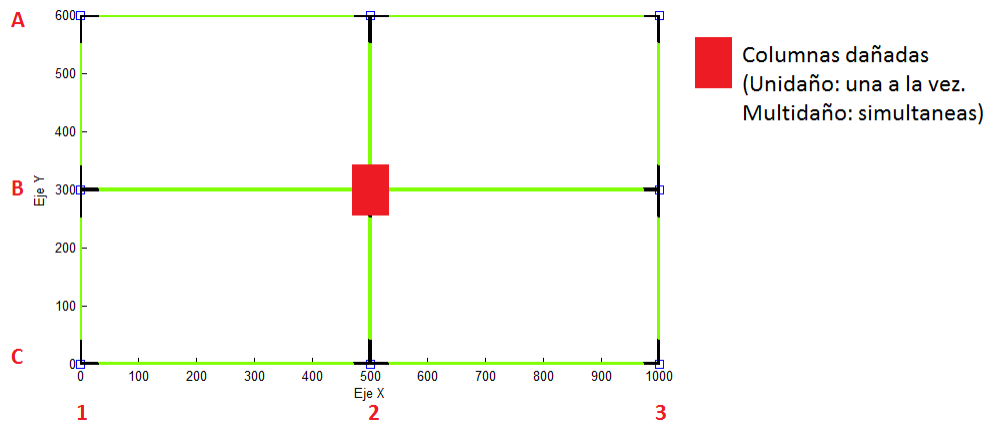


Figura 6. Casos de unidaño a)

- b) Daño en columnas ubicadas sobre el eje C y en B-1 y B-2:

1. En nivel 1 (columna 1, 2, 3, 4 y 5 para un total de 5 casos en unidaño).
2. En nivel 2 (columna 10, 11, 12, 13 y 14 para un total de 5 casos en unidaño).
3. En nivel 3 (columna 19, 20, 21, 22 y 23 para un total de 5 casos en unidaño).

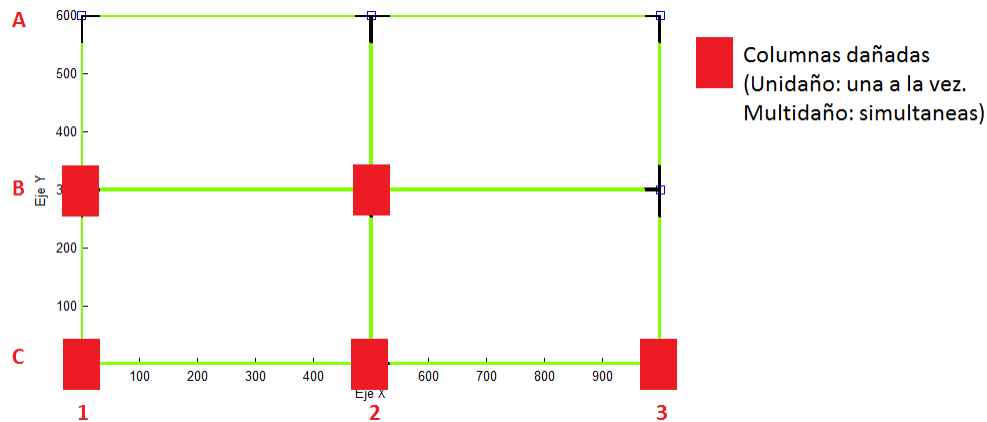


Figura 7. Casos de unidaño b)

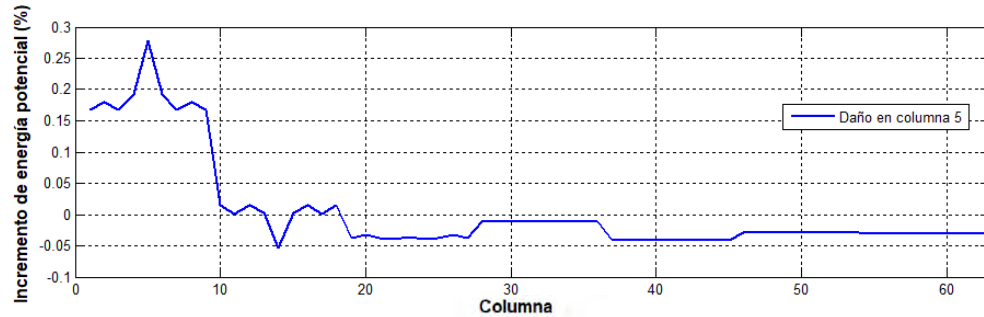
El daño se modela como una degradación del 20% del momento de inercia sobre el eje "Y" global (se encontró que es indiferente utilizar un nivel de degradación u otro, ver gráfica 4.16), con una longitud de 5% de la longitud del elemento, en el nodo inferior de la columna (**nivel de daño de referencia**).

Además, el incremento de energía potencial registrada para cada columna en cada forma modal considerada fue afectado por el factor de participación modal del modo correspondiente. Esto debido a que cada forma modal participa en distinta proporción al comportamiento dinámico de la estructura.

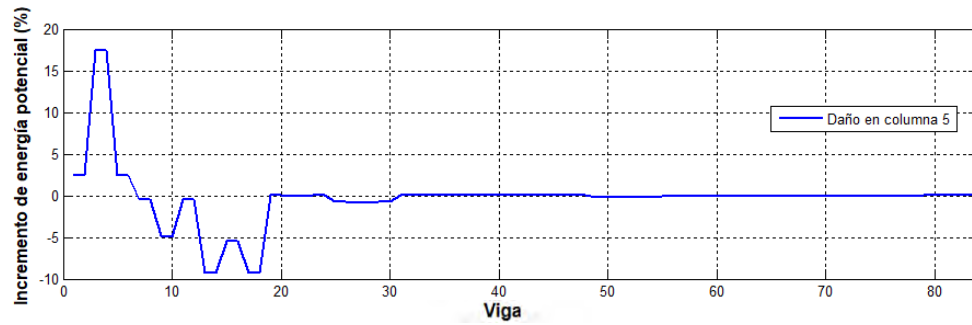
Las formas modales utilizadas en este caso fueron las 3 primeras en ambas direcciones horizontales, las cuales corresponden a una participación del 91% del comportamiento dinámico.

4.2.1. Unidano

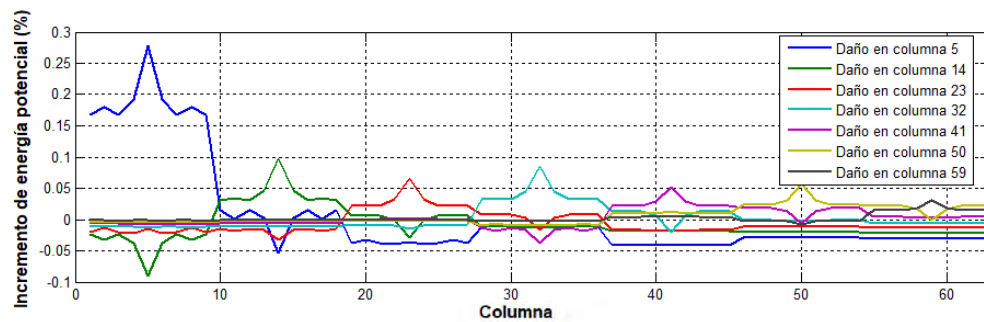
En las gráficas mostradas a continuación, cada curva representa el incremento de energía potencial en el elemento “i” debido al caso de daño “j”, separados en columnas y vigas. A los datos correspondientes a estas curvas se le llamarán vectores de unidano del caso “j” (Ud_j).



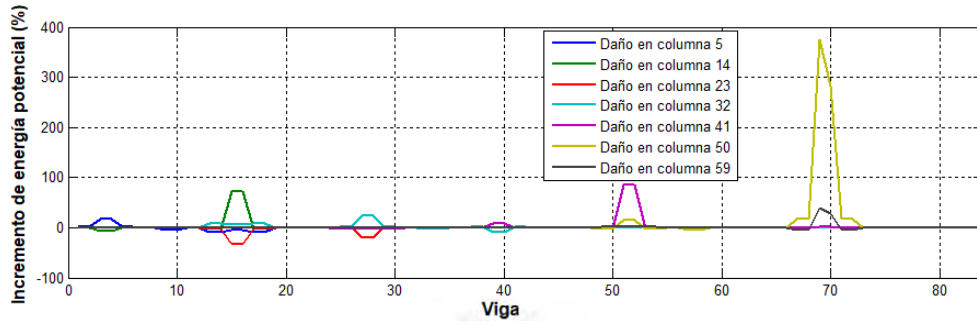
Gráfica 4.20. Incremento de energía potencial en columnas debido a daño existente en columna 5.



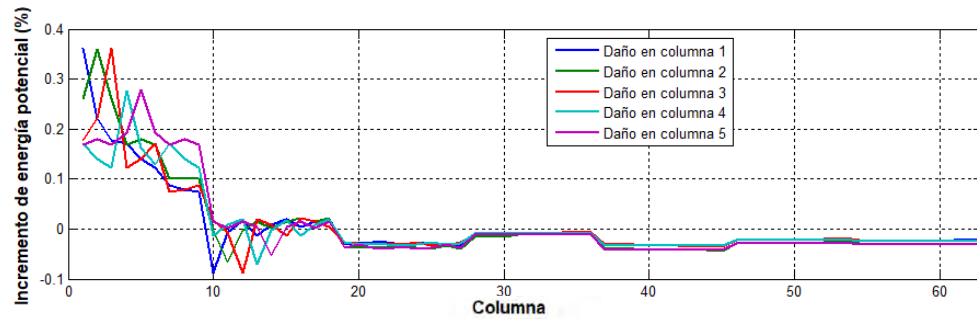
Gráfica 4.21. Incremento de energía potencial en vigas debido a daño existente en columna 5.



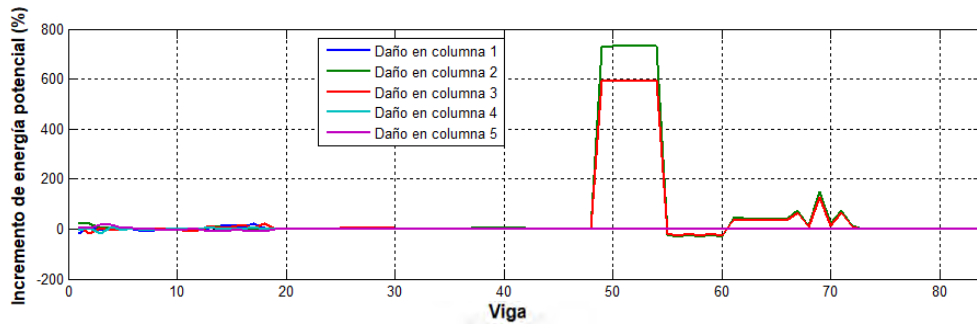
Gráfica 4.22. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (caso a).



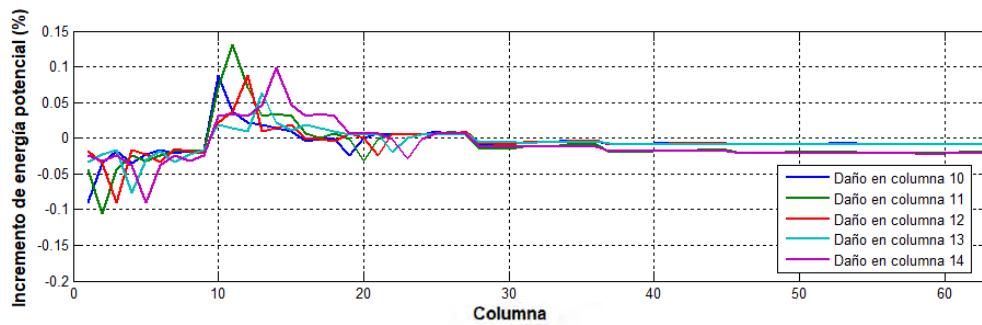
Gráfica 4.23. Análisis paramétrico, cambio de energía en vigas (caso a).



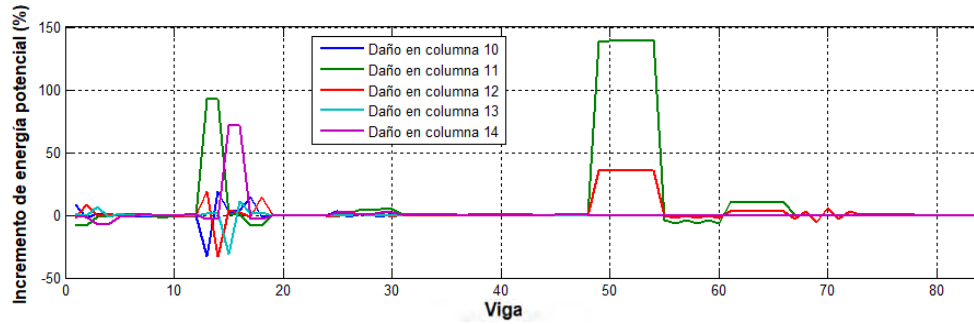
Gráfica 4.24. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (caso b1).



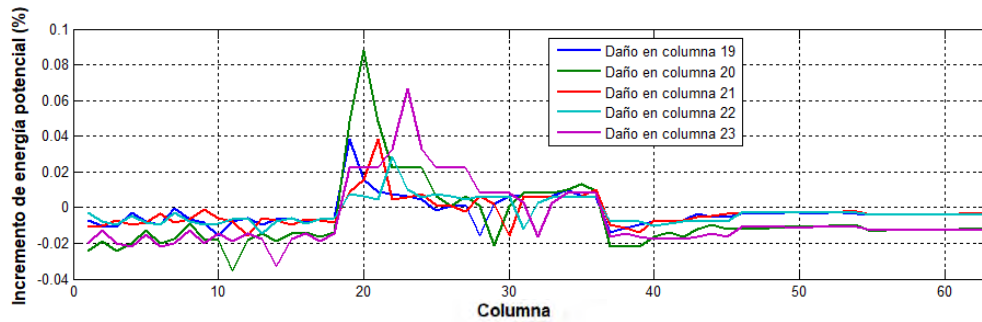
Gráfica 4.25. Análisis paramétrico, cambio de energía en vigas (caso b1).



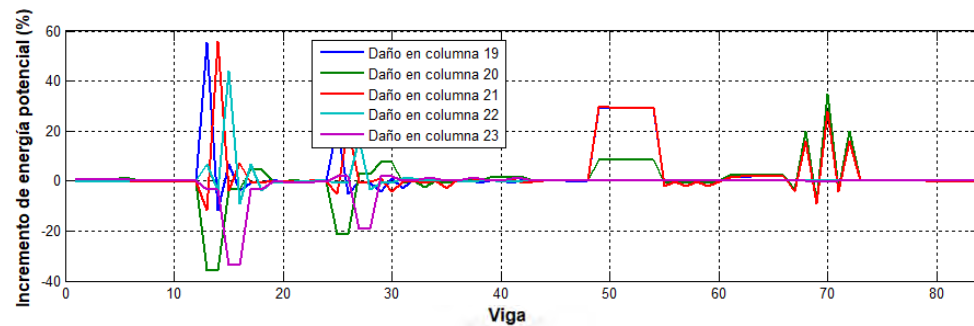
Gráfica 4.26. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (caso b2).



Gráfica 4.27. Análisis paramétrico, cambio de energía en vigas (caso b2).



Gráfica 4.28. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (caso b3).



Gráfica 4.29. Análisis paramétrico, cambio de energía en vigas (caso b3).

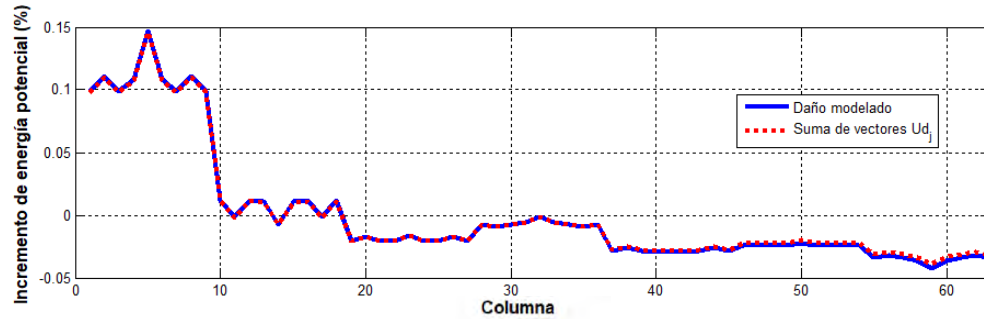
De la gráfica 4.22 a la gráfica 4.29, se observa que cada caso de daño tiene un patrón único de daño (incremento de energía potencial) que lo diferencia de los demás casos de daño. La columna que desarrolla más incremento de energía coincide con la columna dañada para cada caso de daño considerado. Sin embargo, no basta con observar el incremento de energía que desarrollan para descartar elementos no dañados.

La posible razón por la que el incremento de energía en las vigas es de gran magnitud, es que al no considerar giros, se supone que la deformación de la viga es mucho mayor a la real (al no considerar giros, el elemento no gira como cuerpo rígido, sino que se deforma por desplazamiento lateral).

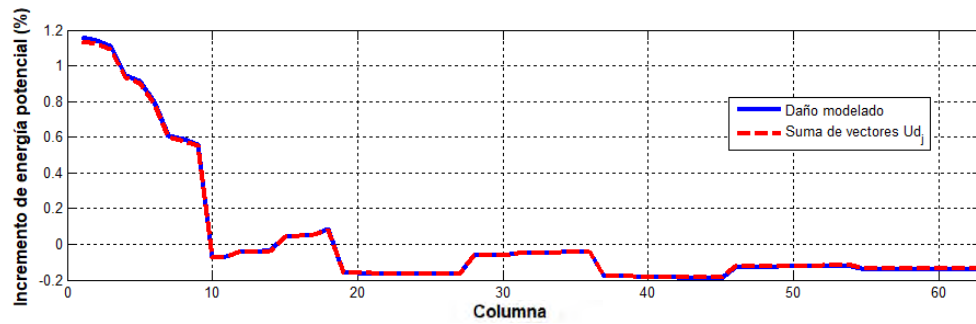
4.2.2. Multidaño

Los resultados se obtuvieron de dos formas diferentes, con el motivo de encontrar una relación entre los casos de unidaño y multidaño:

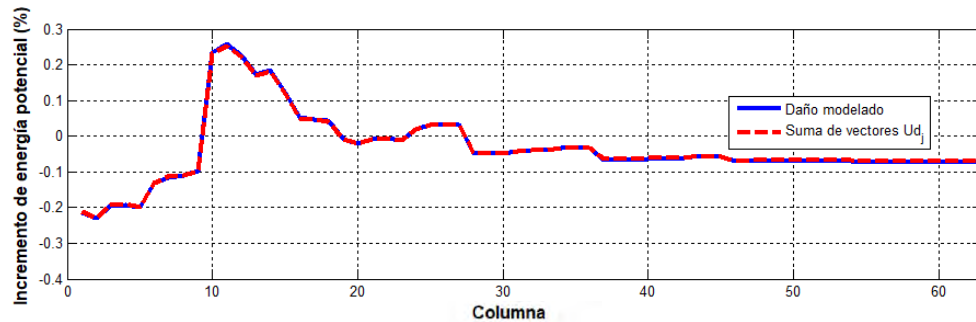
1. Al modelar el daño en todos los elementos considerados.
2. Al sumar directamente los vectores de unidaño para cada caso de daño considerado.



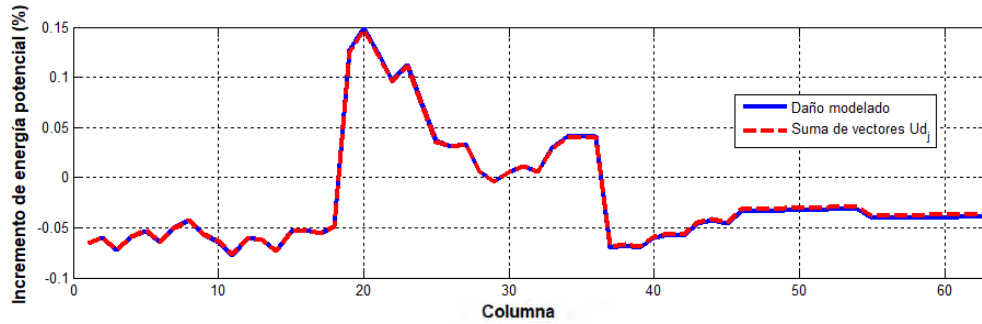
Gráfica 4.30. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (Multidaño caso a).



Gráfica 4.31. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (Multidaño caso b1).

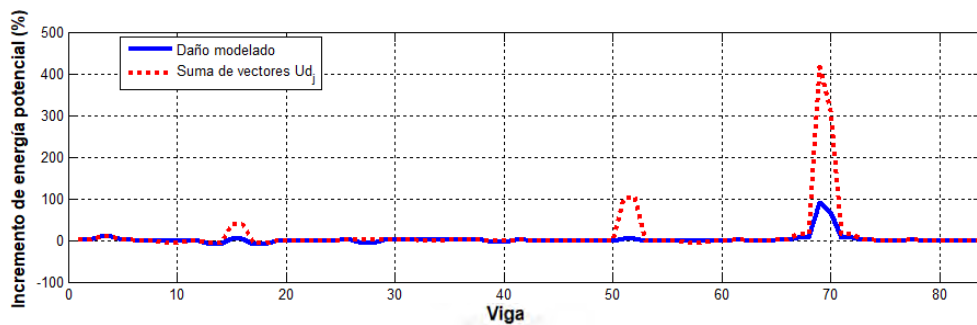


Gráfica 4.32. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (Multidaño caso b2).



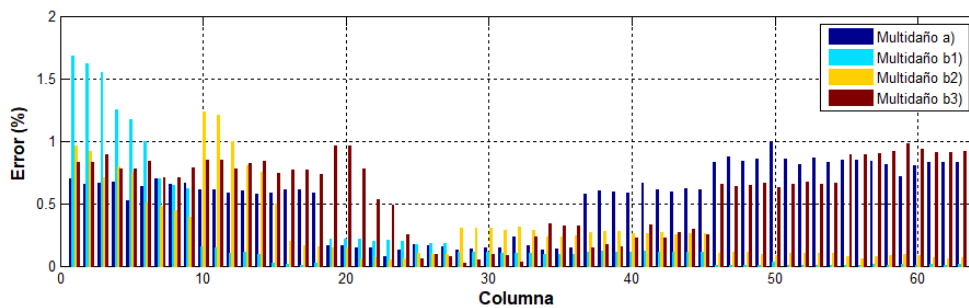
Gráfica 4.33. Análisis paramétrico, cambio de energía en columnas (Multidaño caso b3).

Dado que no se encontró relación lineal entre los casos de unidaño y multidaño para el cambio de energía presentado en las vigas, sólo se presenta la gráfica correspondiente al caso de multidaño a).



Gráfica 4.34. Análisis paramétrico, cambio de energía en vigas (Multidaño caso a).

Al graficar el error entre los vectores de daño modelado contra la suma de vectores, con respecto a la máxima amplitud del vector de daño modelado, se tiene la gráfica 4.35.



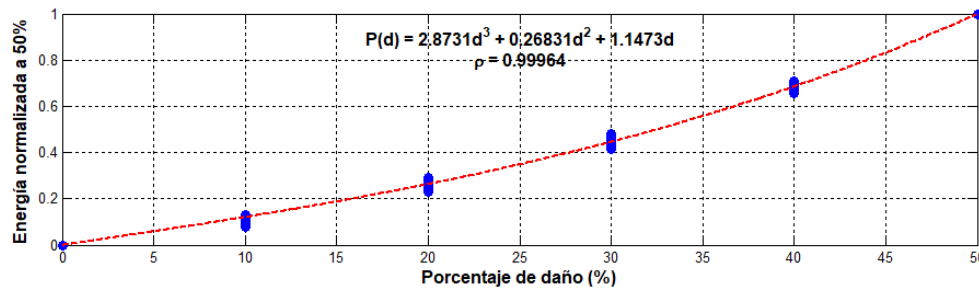
Gráfica 4.35. Error entre daño modelado y suma de vectores U_{d_j} .

En la gráfica 4.35, se observa que el incremento de energía potencial calculado en las columnas modelando los casos de daño es idéntico al calculado sumando los vectores U_{d_j} (errores menores al 2%). Esto implica que el incremento de energía potencial total para cada columna es proporcional a la amplitud de los vectores U_{d_j} de todos los elementos dañados considerados.

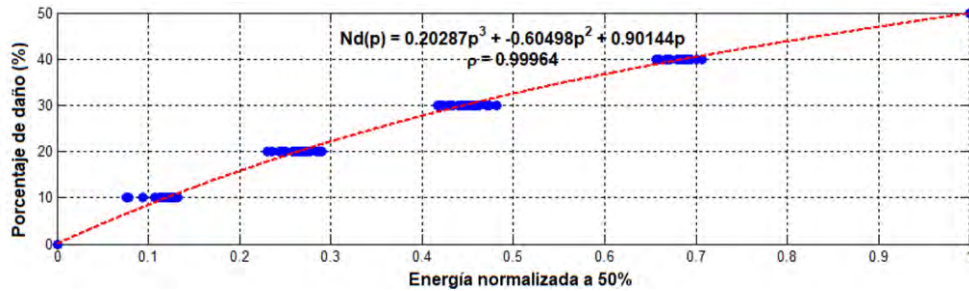
Para el caso de las vigas (Gráfica 4.34), no se encontró relación entre los casos de daño y los casos de multidaño, por lo que el cambio en la energía que desarrollan no se tomará en cuenta para los análisis futuros.

4.2.3. Daño incremental

Con el motivo de encontrar la relación entre nivel de daño y energía potencial desarrollada en las columnas para este modelo en específico, se realiza un análisis de daño incremental. Este análisis consiste en dañar una columna con un nivel de daño de 10% hasta 50% en pasos de 10% del momento de inercia e ir capturando el incremento de energía que desarrollan todas las columnas. El incremento de energía se normaliza con respecto al desarrollado para un nivel de daño del 50%. Esta información se presenta de dos formas, como energía normalizada que depende de un nivel de daño (Gráfica 4.36) y como nivel de daño que depende de la energía normalizada (Gráfica 4.37).



Gráfica 4.36. Variación de la energía desarrollada con respecto al nivel de daño.



Gráfica 4.37. Variación del nivel de daño con respecto a la energía normalizada.

En las gráficas anteriores, se obtienen ecuaciones que representan la variación de los datos calculados en el análisis de daño incremental. Estas ecuaciones sólo son representativas para el modelo analizado, en cualquier otro caso deben obtenerse gráficas y ecuaciones similares.

Las variables mostradas en las ecuaciones de las gráficas son las siguientes:

- $P(d)$ = Incremento de energía normalizada a 50% que se desarrolla en un nivel de daño “ d ”.
- $Nd(p)$ = Nivel de daño necesario para desarrollar el incremento de energía “ p ”.
- d = Nivel de daño (degradación del momento de inercia).
- p = Incremento de energía normalizada a 50%.
- ρ = Coeficiente de correlación entre los datos y las ecuaciones que los representan.

Al comparar la gráfica 4.36 con la gráfica 4.19, se observa que para ambos modelos, el efecto del daño incremental sobre las columnas se comporta de igual forma.

Capítulo 5. Propuesta de metodología de detección de daño estructural

Dado los resultados obtenidos de los análisis anteriores, se propone que el incremento de energía potencial en cada columna puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta P_i \approx \sum_j U d_{i,j} * D_j$$

donde:

- ΔP_i = Incremento de energía potencial de la columna “i”.
- $U d_{i,j}$ = Incremento de energía potencial de la columna “i” debido a la presencia del caso de daño “j”.
- D_j = Incógnita que representa el porcentaje de energía que desarrolla el elemento “j” con respecto a la energía que desarrolla con un nivel de daño de referencia en el cálculo de $U d_j$. Funciona como un factor de escalamiento. Las componentes positivas del este vector indican la presencia de daño.

De forma matricial:

$$\{\Delta P\} \approx [U d] \{D\} \quad \text{ec. 7}$$

De la ec. 7 puede despejarse $\{D\}$, entonces:

$$\{D\} \approx [U d]^{-1} \{\Delta P\} \quad \text{ec. 8}$$

Sin embargo, $[U d]$ no es necesariamente una matriz cuadrada:

- El número de filas es igual al número de columnas existentes en la estructura.
- El número de columnas dependerá del número de casos de daño considerados $\{U d_j\}$ con un nivel de daño específico. De esto dependerá la capacidad de detectar daño espacialmente en la estructura.

Por tanto, para el cálculo de su inversa deberá usarse la pseudoinversa en su lugar.

Pero este no es el nivel de daño, sólo es una proporción de la energía desarrollada para un nivel de daño de referencia. Entonces, el nivel de daño se obtendrá con ayuda de las ecuaciones mostradas en la gráfica 4.36 y la gráfica 4.37:

$$Daño(j) = Nd \left(D_j * P(Daño_{ref}) \right) \quad \text{ec. 9}$$

donde:

- $Daño(j)$ = Nivel de daño detectado para el caso de daño “j”.
- $Nd()$ = Nivel de daño para un nivel de incremento de energía (ver gráfica 4.37).
- $P(Daño_{ref})$ = Incremento de energía para un nivel de daño de referencia (ver gráfica 4.36).
- D_j = Entrada del vector D correspondiente al caso de daño “j”.

Sin embargo, pueden existir casos en los que la matriz de daño tenga menos filas que columnas (mas variables que datos), esto implicaría que existe un número infinito de posibles soluciones para poder reproducir un caso de multidaño. Por esto, la metodología debe aplicarse por pasos:

1. Definir alguna medida de comparación entre resultado esperado $\{\Delta P\}$ (el cual se calcula con las formas modales obtenidas de la estructura, debido al daño real) y resultado obtenido $[Ud]*\{D\}$ (reproducción del daño real a partir de casos de daño simulados).
2. Suponer que sólo hay un caso de daño existente en la estructura, esto implica una matriz de daño de una sola columna.
3. Realizar un barrido de las “n” combinaciones posibles para el número de casos de daño y definir “n” matrices de daño como tales combinaciones.
4. Obtener la pseudoinversa de las “n” matrices de daño y aplicar la ec. 8 para obtener $\{D\}$.
5. Aplicar la medida de comparación entre $\{\Delta P\}$ y el producto $[Ud]*\{D\}$, entonces comparar los resultados con un nivel de aceptación.
6. En caso de que la medida de comparación no cumpla con el nivel de aceptación, incrementar el número de casos de daño simultáneos en la estructura y repetir los incisos 3 al 5.
7. Aplicar la ec. 9 para transformar el vector de escalamiento a niveles de daño. Sólo considerar aquellas combinaciones con componentes positivas del vector $\{D\}$

La ecuación para la medida de comparación propuesta es el coeficiente de correlación entre dos vectores, el cual se calcula con la expresión:

$$\rho(A,B) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right) \quad \text{ec. 10}$$

donde:

- $\rho(A,B)$ = Coeficiente de correlación entre los vectores A y B.
- A = Vector de incremento de energía potencial $\{\Delta P\}$.
- B = Producto de la matriz de daño y el vector de escalamiento $[Ud]*\{D\}$.
- μ = Valor medio del vector A o B.
- σ = Desviación estándar de A o B.
- N = Número de datos en el vector A o B.

Con lo anterior, se espera poder encontrar las combinaciones de daño que más se ajusten al vector $\{\Delta P\}$ encontrado (el cual es el correspondiente al daño real presente). Además, tales combinaciones serán las que requieran el menor número de casos de daño simultáneos para lograr el ajuste requerido (coeficiente de correlación).

5.1. Procedimiento del análisis de detección de daño

Para los ejemplos realizados, se toma el modelo de 7 niveles y se definen los tipos de daño mostrados en la tabla 2. El daño de referencia es una degradación de 20% del momento de inercia en una longitud del 5% de la longitud del elemento. Se considera que sólo pueden medirse componentes de traslación horizontal de las formas modales.

Tabla 2. Tipos de daño.

Tipo de elemento	Tipo de daño	Descripción
Columna	1	Degradación de I_x en nodo inferior
	2	Degradación de I_y en nodo inferior
	3	Degradación de I_x en nodo superior
	4	Degradación de I_y en nodo superior
Viga	1	Degradación del momento de inercia sobre eje horizontal nodo origen
	2	Degradación del momento de inercia sobre eje horizontal nodo destino

En la realidad se tiene un número limitado de sensores, por lo que sólo se pueden instrumentar algunos grados de libertad. Por lo que el análisis se realiza en dos pasos:

1. Considerar que sólo se puede obtener información de las componentes modales en dos puntos de la estructura por entrepiso (una componente en X y otra en Y). Después se obtienen los vectores de unidaño para cada tipo de daño en cada entrepiso y se aplica el método de detección de daño para determinar los entrepisos dañados. En la figura 8, se muestra la ubicación de los sensores utilizados (los rojos miden componente en X, mientras que los azules miden la componente en Y).

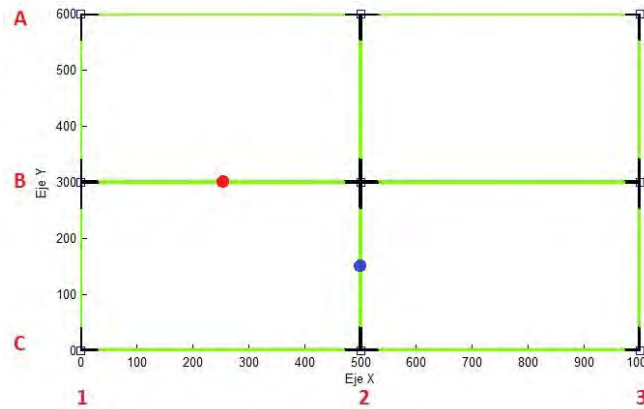


Figura 8. Distribución de sensores, paso 1.

Con esta distribución, se tienen 2 puntos instrumentados por entrepiso, lo que da como resultado un total de 14 puntos instrumentados.

Para este paso y modelo en específico, resulta indiferente la posición de los sensores, ya que sólo se busca encontrar el entrepiso dañado (Sólo se requiere que los distintos entrepisos desarrollen distinta magnitud del incremento de energía potencial).

2. Una vez definido cuál es el entrepiso dañado, se procede a reacomodar los sensores al entrepiso dañado, de tal forma que se pueda obtener las componentes modales de cada marco en distintos nodos (ver figura 9). El desplazamiento de los nodos no instrumentados se calculará como una interpolación entre los desplazamientos de los nodos adyacentes instrumentados. Después, se obtienen los vectores de unidano para cada tipo de daño considerado en todos los elementos del entrepiso. Una vez obtenida la matriz de daño, se procede a definir los elementos dañados al aplicar el método de detección de daño propuesto.

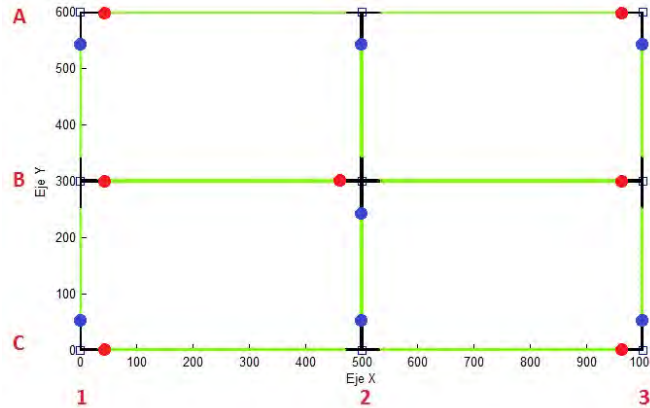


Figura 9. Distribución de sensores, paso 2.

En este paso se tienen 9 nodos instrumentados, de los cuales 5 están instrumentados en ambos ejes horizontales (eje X y eje Y), mientras que 4 sólo en un eje horizontal.

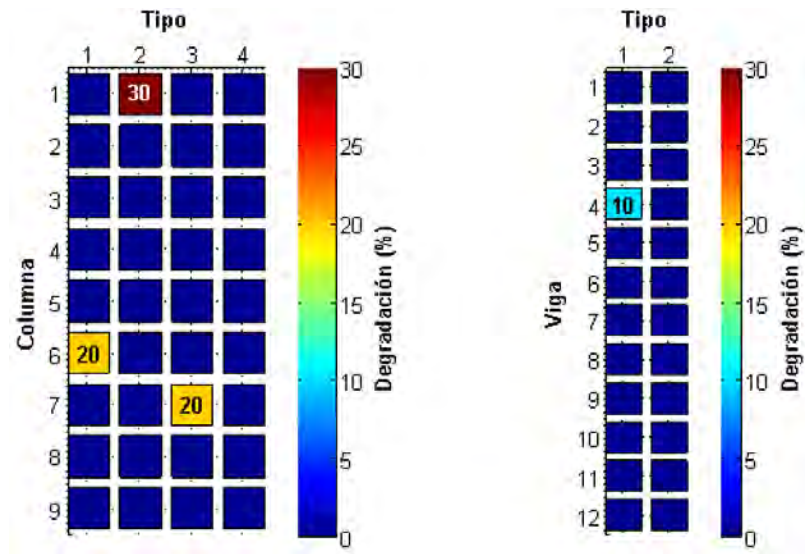
Para este paso es importante tener instrumentados distintos puntos del entrepiso. Esto es porque para poder conocer los elementos dañados, es necesario que los elementos del entrepiso desarrollen distintas magnitudes de incremento de energía potencial.

5.2. Ejemplo 1, daño principal en columnas de entrepiso 1

Los daños asignados en este ejemplo son los siguientes (presentados en la tabla 3 y la gráfica 5.1), todos ubicados en el entrepiso 1. La longitud de daño es del 5% de la longitud del elemento correspondiente. Se muestra la configuración estructural del entrepiso en la figura 10.

Tabla 3. Elementos dañados, ejemplo 1.

Tipo de elemento	Número de elemento	Tipo de daño	Nivel de degradación
Columna	1	2	30%
	6	1	20%
	7	3	20%
Viga	4	1	10%



Gráfica 5.1. Elementos dañados, ejemplo 1.

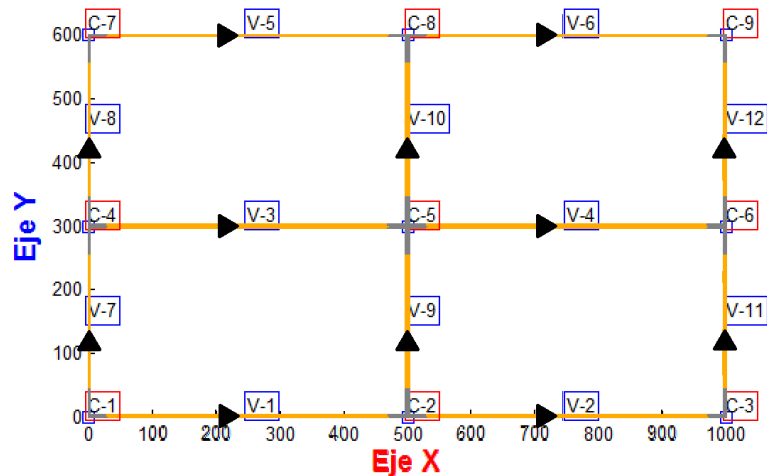


Figura 10. Distribución y orientación de elementos en planta, entrepiso 1.

5.2.1. Paso 1, definición de entrepiso dañado

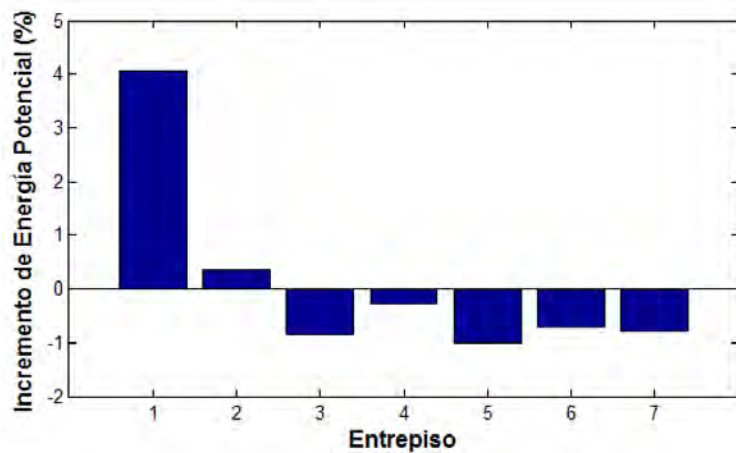
Lo primero por hacer es obtener los vectores de undañeo para cada tipo de daño en cada entrepiso. Al sólo tener dos componentes modales, todos los elementos de cada entrepiso tienen los mismos desplazamientos nodales, y por lo tanto desarrollan la misma energía. Por esto, basta con obtener los vectores para una sola columna por entrepiso. La matriz de daño [Ud] es de 7x56 (ver gráfica 5.2):

- 7 Entrepisos.
- 56 casos de daño:
 - 4 casos por columna en cada entrepiso = 28.
 - 2 casos por viga orientada en dirección X = 14.
 - 2 casos por viga orientada en dirección Y = 14.



Gráfica 5.2. Matriz de daño a nivel entrepiso, ejemplo 1.

Para este paso, se obtiene el vector de incremento de energía potencial $\{\Delta P\}$ desarrollada en cada entrepiso, el cual se muestra en la gráfica 5.3.

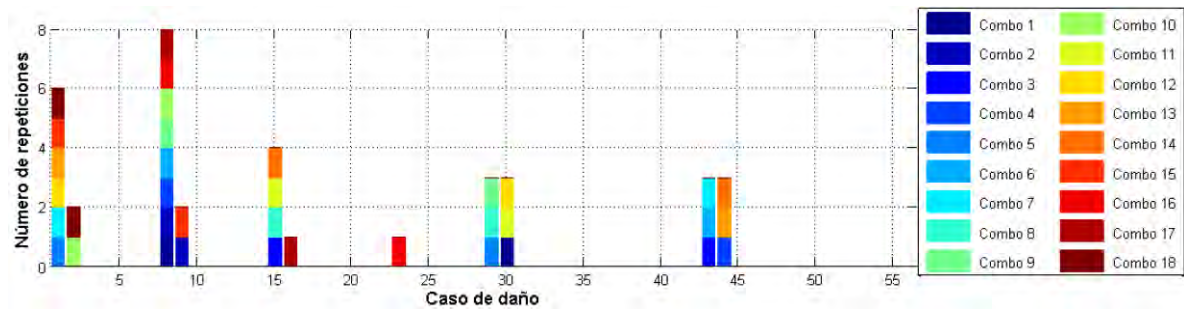


Gráfica 5.3. Vector de incremento de energía potencial por entrepiso $\{\Delta P\}$, ejemplo 1.

Una vez obtenido el vector $\{\Delta P\}$, se procede a aplicar la metodología de detección de daño. Si se utiliza como nivel de aceptación un valor mínimo del coeficiente de correlación de 0.99, se obtiene lo siguiente:

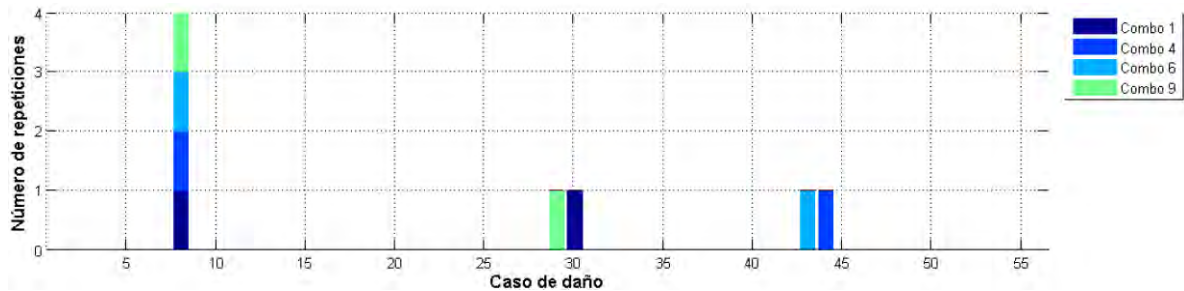
- Se necesita considerar que se presenta un caso de daño en columnas y uno en vigas.
- Se tienen 18 combinaciones diferentes que cumplen con el coeficiente de correlación mínimo.

Al graficar el acumulado de combinaciones de casos de daño, se tiene la gráfica 5.4.



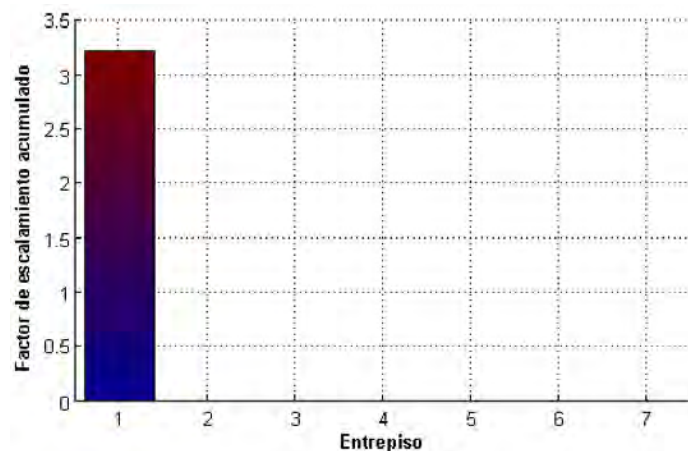
Gráfica 5.4. Acumulado de casos de daño, paso 1, ejemplo 1.

Se sabe que se necesita considerar sólo un caso de daño en columnas y vigas. Si sólo se considera el caso de daño en columnas con más repeticiones, se tiene un nuevo acumulado de combinaciones, el cual se muestra en la gráfica 5.5.



Gráfica 5.5. Acumulado reducido de casos de daño, paso 1, ejemplo 1.

Si el vector de escalamiento $\{D\}$ (de cualquier combinación que se muestra en la gráfica 5.5) se acomoda acumulando los factores de escalamiento de cada caso de daño a su respectivo entrepiso, se obtiene la gráfica 5.6.



Gráfica 5.6. Entrepisos dañados, ejemplo 1.

De este primer análisis, se concluye que el entrepiso dañado es el entrepiso 1.

5.2.2. Paso 2, definición de elementos dañados

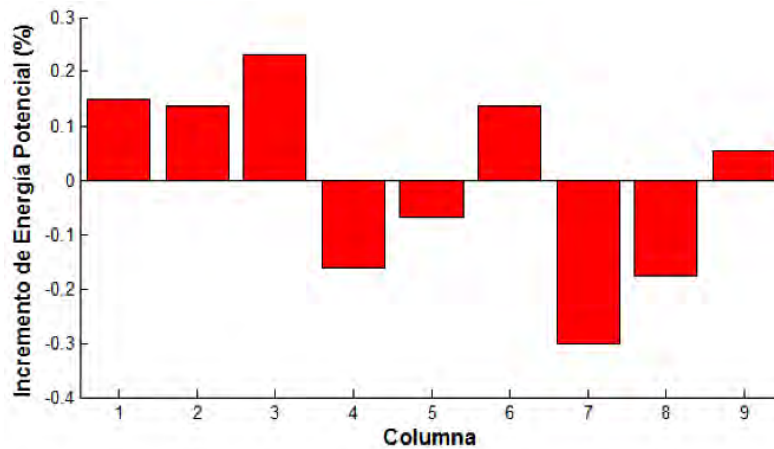
Una vez definido el entrepiso dañado, se obtienen los vectores de unidaño para cada tipo de daño en columnas y vigas del entrepiso dañado. Esto resulta una matriz [Ud] de 9x60 (Gráfica 5.7):

- 9 Columnas desplantadas en el entrepiso dañado.
- 60 casos de daño:
 - 4 casos por columna = 36.
 - 2 casos por viga orientada en cada dirección = 24.



Gráfica 5.7. Matriz de daño a nivel elemento, ejemplo 1.

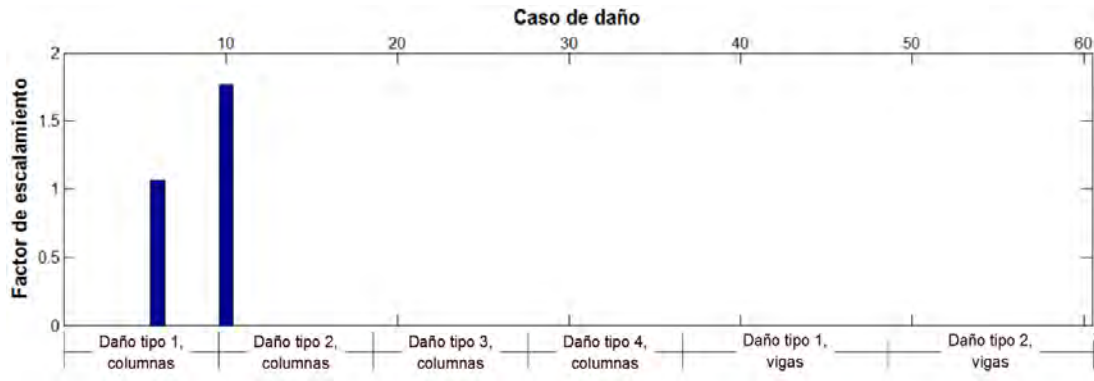
Para este paso, se obtiene que el vector de incremento de energía potencial $\{\Delta P\}$ desarrollada en cada columna del entrepiso dañado, el cual es el siguiente:



Gráfica 5.8. Vector de incremento de energía potencial por elemento $\{\Delta P\}$, ejemplo 1.

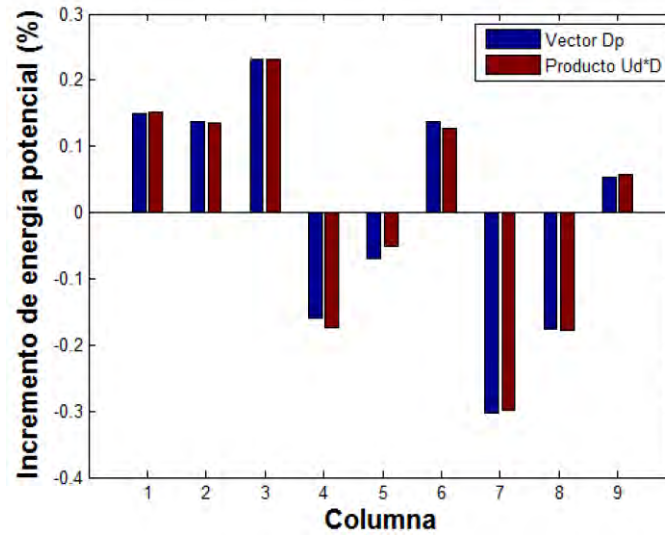
Aplicando la metodología propuesta, al utilizar un coeficiente de correlación mínimo de 0.99, se tiene lo siguiente:

- Se necesita considerar que la estructura sólo tiene 2 casos de daño, los cuales corresponden a los casos de daño 6 y 10 (Daño en columnas).



Gráfica 5.9. Vector de escalamiento $\{D\}$, ejemplo 1.

- El coeficiente de correlación encontrado fue de 0.9988.



Gráfica 5.10. Comparación entre vector $\{\Delta p\}$ y producto $[U_d] \cdot \{D\}$, ejemplo 1.

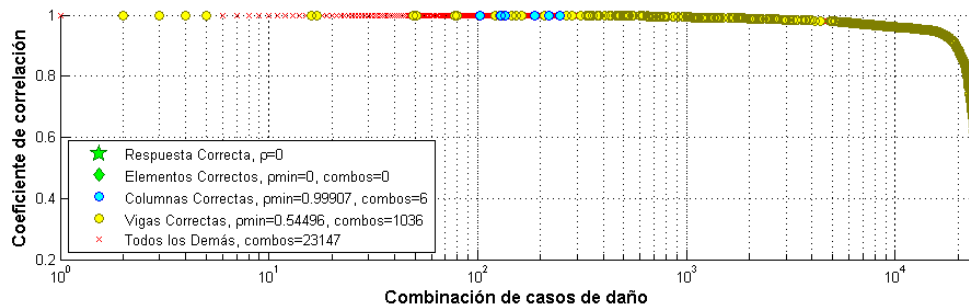
- Al reacomodar por tipo de elemento, tipo de daño y aplicando la ec. 9 para transformar el factor de escalamiento a nivel de daño.



Gráfica 5.11. Elementos dañados detectados, ejemplo 1.

Se lograron encontrar dos elementos dañados con un nivel de daño bastante cercano al asignado (error máximo de 1.1%). Sin embargo, no fue posible detectar daño en el nodo superior de la columna 7 ni en el nodo origen de la viga 4. Esto probablemente debido a la baja amplitud de los vectores de undañeo correspondientes a tales tipos de daño con respecto al daño en nodo inferior de columnas.

Se sabe que existen 4 tipos de daño en la estructura. Al graficar todas las combinaciones (que consideren hasta 4 casos de daño simultáneos) con componentes positivas del vector de escalamiento contra su coeficiente de correlación (ordenado de mayor a menor), se tiene la gráfica 5.12.



Gráfica 5.12. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 1.

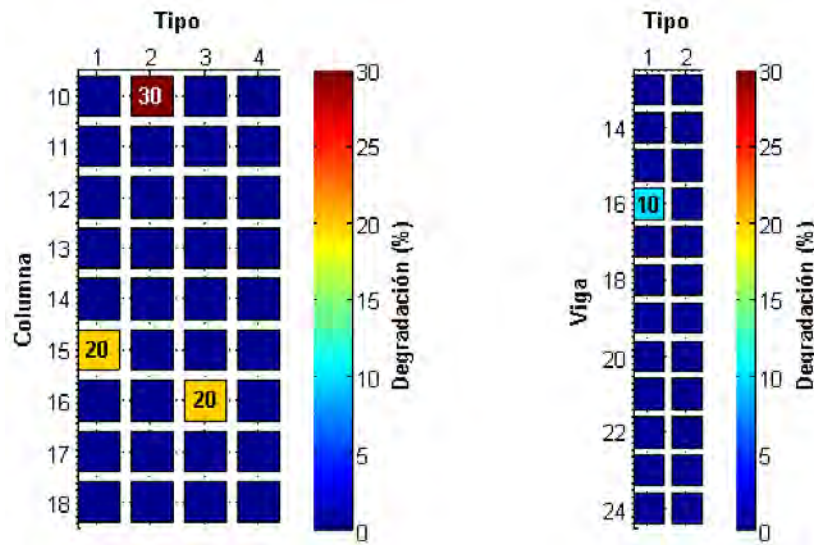
En la gráfica 5.12, (para el ejemplo considerado) se observa que no se pudo encontrar la combinación que represente el daño real correctamente, debido a que ella contenía componentes negativas del coeficiente de correlación. De acuerdo a la gráfica, es posible detectar daño en columnas correctamente (pudiendo confundir el nodo dañado) si se utilizan coeficientes de correlación mínimos de 0.99907.

5.3. Ejemplo 2, daño principal en columnas de entrespiso 2

Retomando la estructura de los ejemplos anteriores, cambiando el daño localizado al entrespiso 2 (Tabla 4 y Gráfica 5.13). La longitud dañada es del 5% de la longitud del elemento correspondiente. La configuración estructural del entrespiso 2 se muestra en la figura 11.

Tabla 4. Elementos dañados, ejemplo 2.

Tipo de elemento	Número de elemento	Tipo de daño	Nivel de degradación
Columna	10	2	30%
	15	1	20%
	16	3	20%
Viga	16	1	10%



Gráfica 5.13. Elementos dañados, ejemplo 2.

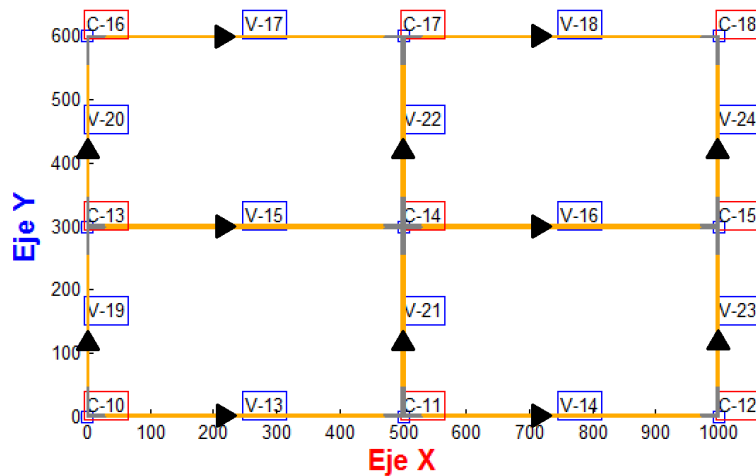
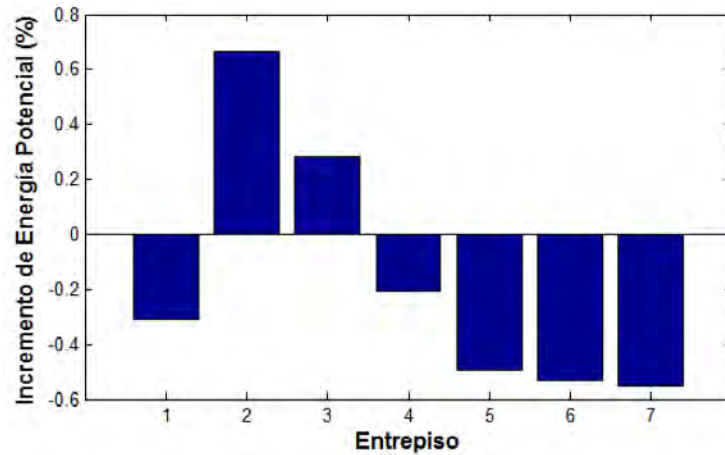


Figura 11. Distribución y orientación de elementos en planta, entrespiso 2.

5.3.1. Paso 1, definición de entrepiso dañado

El vector de incremento de energía potencial $\{\Delta P\}$ obtenido a nivel entrepiso es el mostrado en la gráfica 5.14.

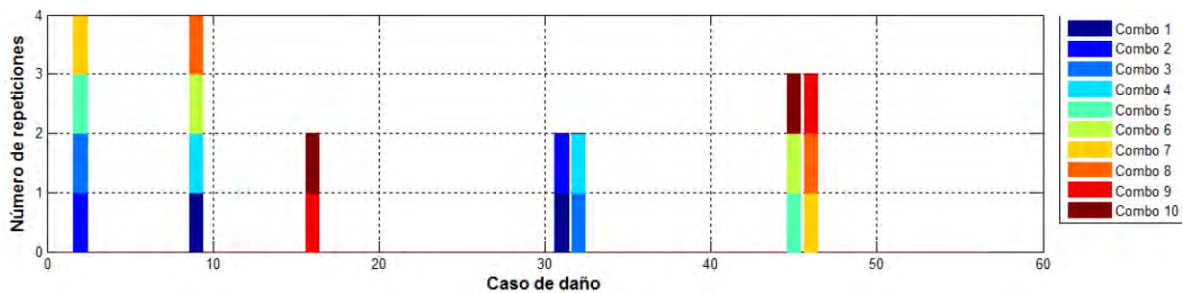


Gráfica 5.14. Vector de incremento de energía potencial por entrepiso $\{\Delta P\}$, ejemplo 2.

Al aplicar la metodología propuesta, utilizando un coeficiente de correlación mínimo de 0.99, se tiene lo siguiente:

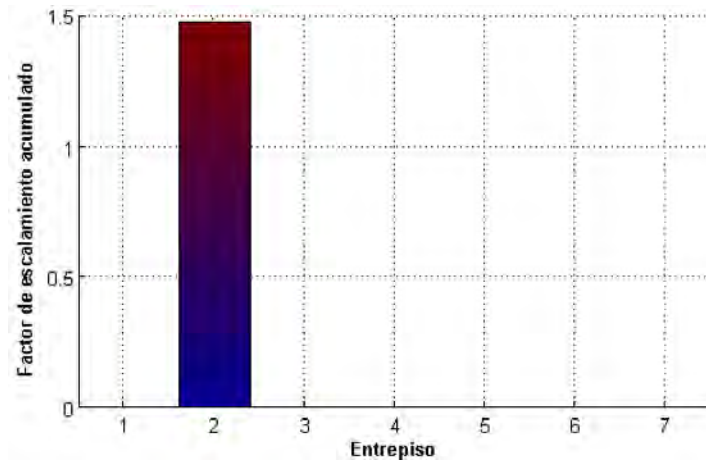
- Se necesita considerar que se presentan 2 casos de daño:
 - 1 caso de daño correspondiente a columnas.
 - 1 caso de daño correspondiente a vigas.
- Se tienen 10 combinaciones de casos de daño que cumplen con el coeficiente de correlación mínimo.

Al graficar el acumulado de las combinaciones de casos de daño, se tienen los resultados mostrados en la gráfica 5.15.



Gráfica 5.15. Acumulado de casos de daño, paso 1, ejemplo 2.

A pesar de obtenerse 10 combinaciones, todos los casos de daño presentes en tales combinaciones corresponden al mismo entrepiso. Si se toma cualquier combinación y su vector de escalamiento $\{D\}$ se reacomoda acumulando los casos de daño por sus correspondientes entrepisos se obtiene la gráfica 5.16.



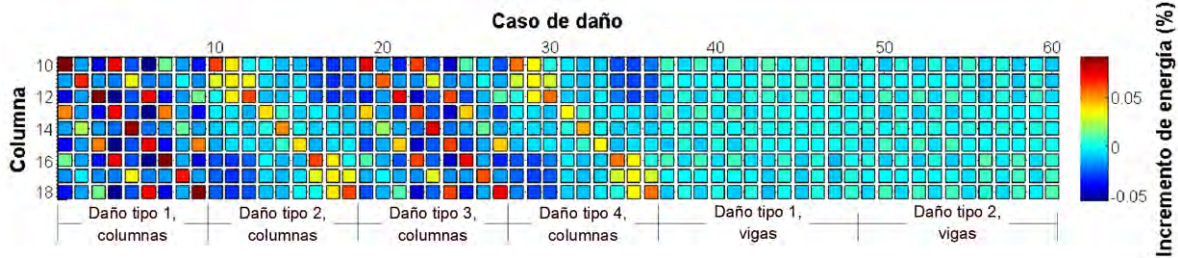
Gráfica 5.16. Entrepisos dañados, ejemplo 2.

De este paso, se concluye que el entrepiso dañado es el entrepiso 2.

5.3.2. Paso 2, definición de elementos dañados

Una vez conocido el entrepiso dañado, se obtienen los vectores de unidaño para cada tipo de daño en cada columna y viga de dicho entrepiso. Esto resulta una matriz de daño [Ud] de 9x60 (Gráfica 5.17):

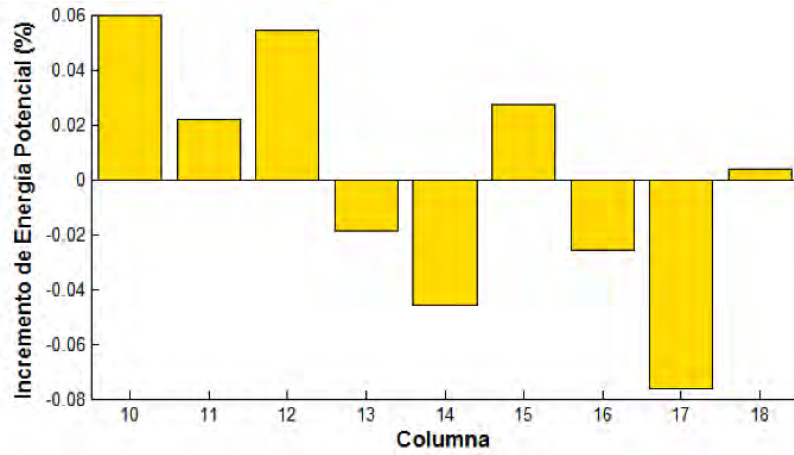
- 9 Columnas desplazadas en el entrepiso dañado.
- 60 casos de daño



Gráfica 5.17. Matriz de daño a nivel elemento, ejemplo 2.

Al observar la matriz de daño, se espera que para este ejemplo sea posible detectar daño tipo 3 y 4 en columnas. Esto debido a que la amplitud de los vectores de unidaño correspondientes a tales tipos de daño es de mayor magnitud en relación al ejemplo 1.

El vector de incremento de energía potencial $\{\Delta P\}$ desarrollada en cada columna del entrepiso dañado es el mostrado en la gráfica 5.18.

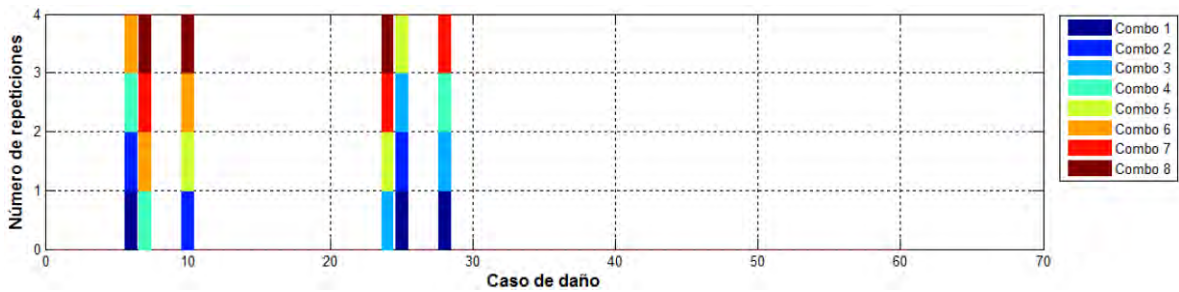


Gráfica 5.18. Vector de incremento de energía potencial por elemento $\{\Delta P\}$, ejemplo 2.

Aplicando la metodología propuesta, al utilizar un coeficiente de correlación mínimo de 0.99, se tiene lo siguiente:

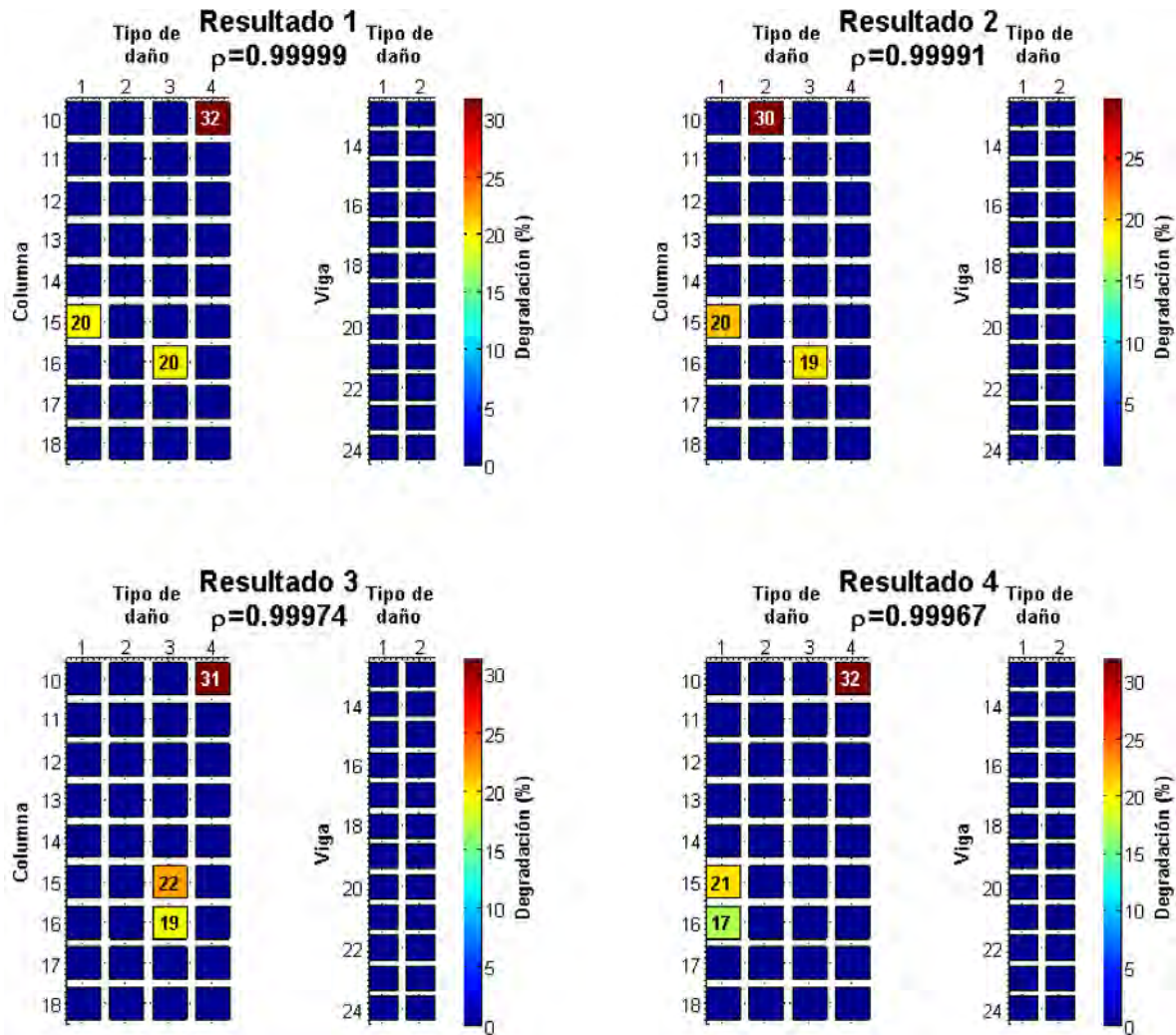
- Se necesita considerar que existen 3 casos de daño en la estructura (correspondientes a daño en columnas).
- Se tienen 8 combinaciones diferentes que cumplen con el coeficiente de correlación mínimo de 0.99.

Al graficar el acumulado de combinaciones de casos de daño, se tiene la gráfica 5.19.



Gráfica 5.19. Acumulado de casos de daño, ejemplo 2.

Al convertir los vectores de escalamiento a nivel de daño, y acomodando los resultados por elemento y tipo de daño (de las 4 combinaciones con mayor coeficiente de correlación) se tiene la gráfica 5.20.



Gráfica 5.20. Elementos dañados detectados, ejemplo 2, resultados 1 a 4.

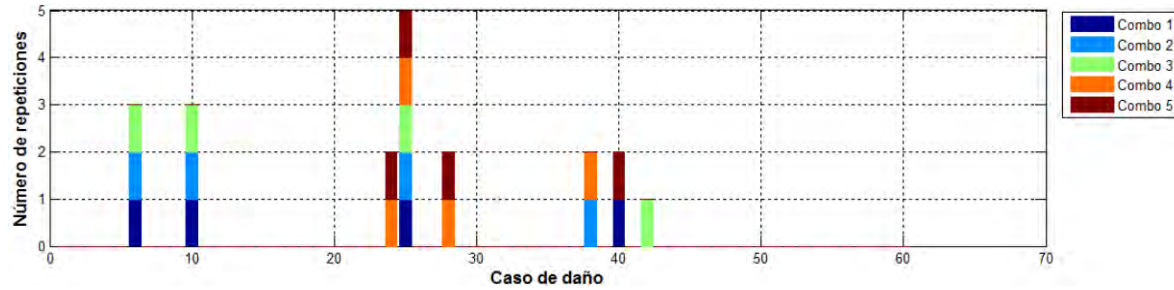
Como se comenta con anterioridad, es posible detectar daño tipo 3 y 4, correspondiente a daño en el nodo superior de las columnas. A pesar de haberse encontrado múltiples posibles combinaciones de undaño, todas las combinaciones incluyen a los mismos elementos dañados, únicamente confundiendo el nodo dañado. No es posible detectar daño en las vigas con el coeficiente de correlación utilizado. El error máximo en el nivel de daño encontrado fue de 3%

La posible causa por la cual no se pudo encontrar daño en la viga, es tal que la amplitud de los vectores de undaño correspondientes a las vigas son de muy baja amplitud en relación a daño en las columnas.

Si se utiliza un coeficiente de correlación mínimo de 0.99999 (mayor al máximo coeficiente encontrado con 3 casos de daño simultáneos) se tiene lo siguiente:

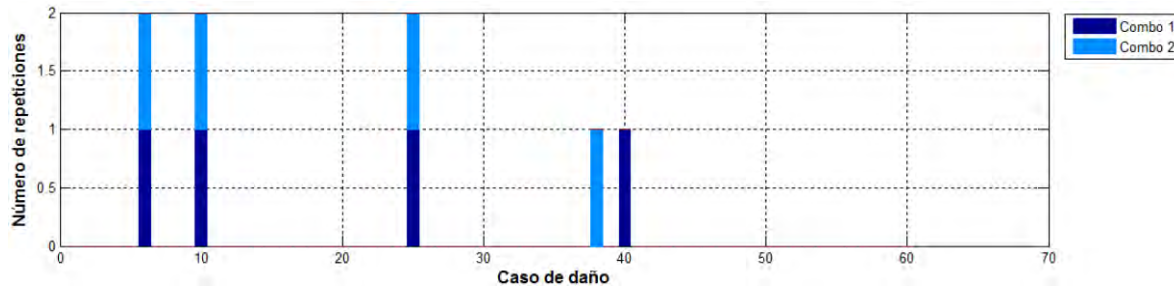
- Se necesita considerar que existen 4 casos de daño en la estructura:
 - 3 Casos de daño en columnas.
 - 1 Caso de daño en vigas.
- Se tienen 5 combinaciones diferentes que cumplen con el coeficiente mínimo.

Al graficar el acumulado de combinaciones de casos de daño, se tiene la gráfica 5.21.



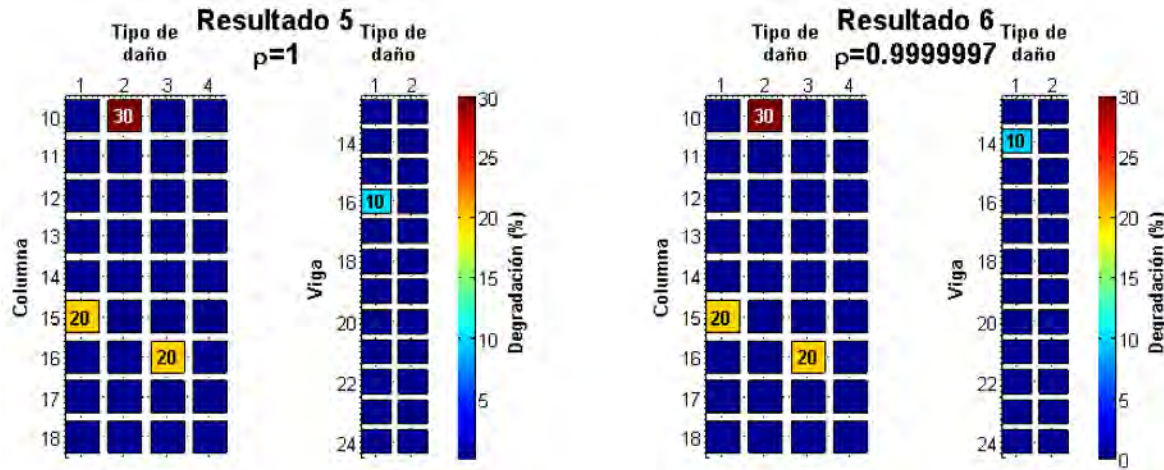
Gráfica 5.21. Nuevo acumulado de casos de daño, ejemplo 2.

Se conoce que se necesitan 3 casos de daño correspondiente a columnas y 1 correspondiente a daño en vigas. Por esto, únicamente se consideran las combinaciones en las cuales se presentan los 3 casos de daño en columnas con mayor número de repeticiones. Además, existen 2 casos de daño en vigas con el mayor número repeticiones, por lo que sólo se consideran aquellas combinaciones que contengan uno de tales casos. El nuevo acumulado de casos de daño es el mostrado en la gráfica 5.22.



Gráfica 5.22. Nuevo acumulado reducido de casos de daño, ejemplo 2.

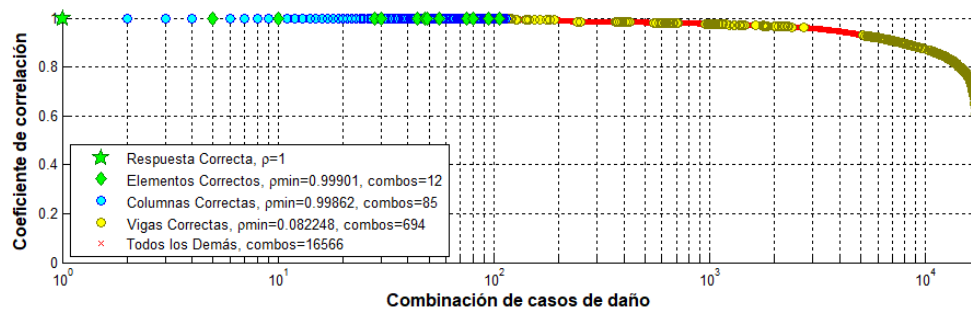
Al convertir los vectores de escalamiento (de las combinaciones resultantes del paso anterior) a nivel de daño y acomodando los resultados por elemento y tipo de daño, se tiene la gráfica 5.23.



Gráfica 5.23. Elementos dañados detectados, ejemplo 2, resultados 5 y 6.

El resultado 5 resulta ser la respuesta correcta para todos los casos de daño presentes, obteniendo niveles de degradación correctos. Para el caso del resultado 6, la metodología confunde la viga dañada, sin embargo, detecta el daño en la misma crujía en la que se encuentra la viga dañada (ver figura 11).

Al graficar todas las combinaciones (considerando el número de casos de daño simultáneos desde 1 y aumentando hasta encontrar la respuesta correcta) que resultaron con componentes positivas del vector de escalamiento contra su correspondiente coeficiente de correlación (ordenado de mayor a menor), se tiene la gráfica 5.24.



Gráfica 5.24. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 2.

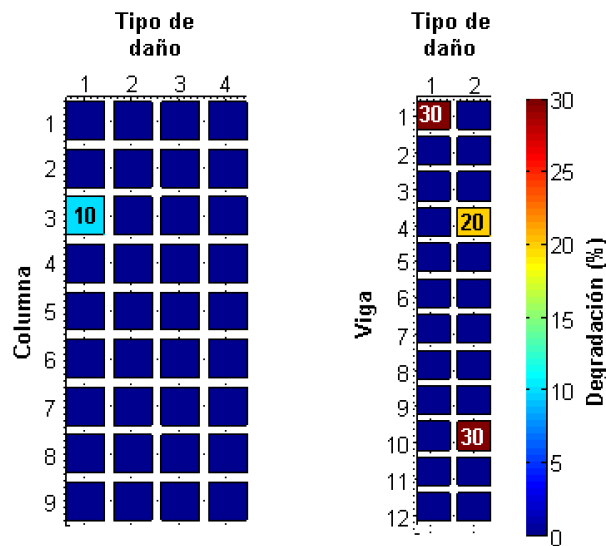
En la gráfica 5.24, (para el ejemplo considerado) se observa que la combinación con mayor coeficiente de correlación resulta ser el resultado correcto. De acuerdo a la misma, es posible detectar daño en todos los elementos correctamente (pudiendo confundir el nodo dañado) si se utiliza un coeficiente de correlación mínimo de 0.99901.

5.4. Ejemplo 3, daño principal en vigas de entrepiso 1

Retomando la estructura de los ejemplos anteriores, asignando los casos de daño que se muestran en la tabla 5 y la gráfica 5.25. La longitud dañada es del 5% de la longitud del elemento correspondiente. La configuración estructural del entrepiso 1 se muestra en la figura 10.

Tabla 5. Elementos dañados, ejemplo 3.

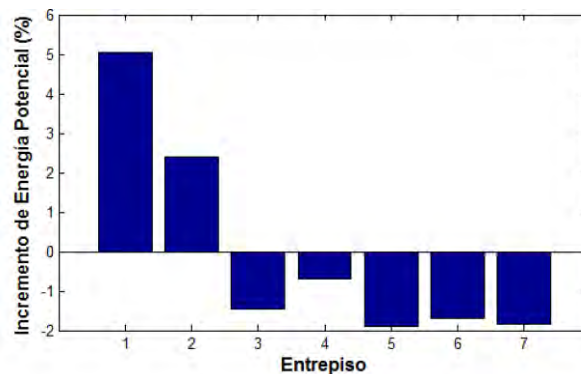
Tipo de elemento	Número de elemento	Tipo de daño	Nivel de degradación
Columna	3	1	10%
Viga	1	1	30%
	4	2	20%
	10	2	30%



Gráfica 5.25. Elementos dañados, ejemplo 3.

5.4.1. Paso 1, definición de entrepiso dañado

El vector de incremento de energía potencial $\{\Delta P\}$ obtenido a nivel entrepiso es el mostrado en la gráfica 5.26.

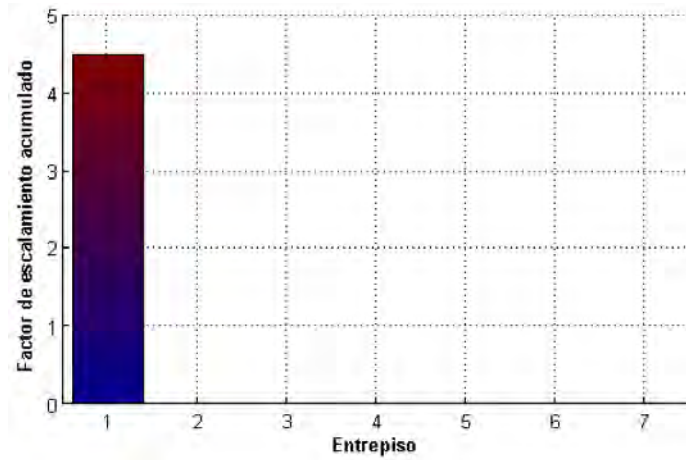


Gráfica 5.26. Vector de incremento de energía potencial por entrepiso $\{\Delta P\}$, ejemplo 3.

Al aplicar la metodología de detección de daño, con un coeficiente de correlación mínimo de 0.99:

- Se necesita considerar que se presenta 1 caso de daño en vigas.
- Se tienen 2 casos de daño que cumplen con el coeficiente de correlación mínimo.

Ambos casos de daño resultantes corresponden al mismo entrepiso. Si se toma cualquier caso y su vector de escalamiento $\{D\}$ se reacomoda su correspondiente entrepiso, se obtiene la gráfica 5.27.



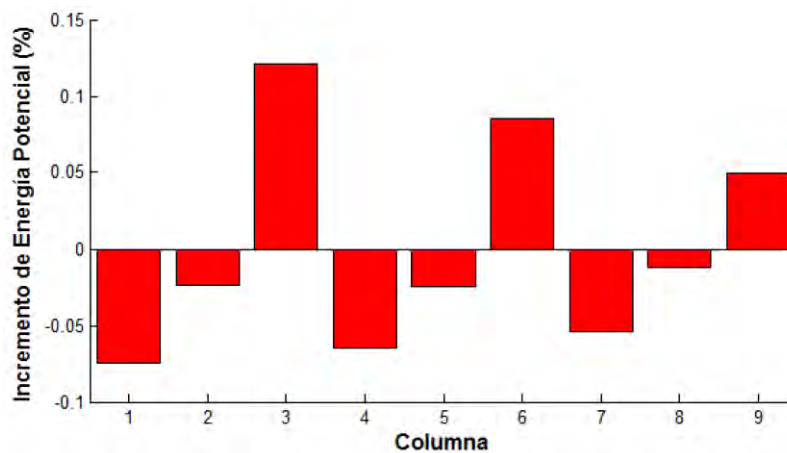
Gráfica 5.27. Entrepisos dañados, ejemplo 3.

De este paso, se concluye que el entrepiso dañado es el entrepiso 1.

5.4.2. Paso 2, definición de elementos dañados

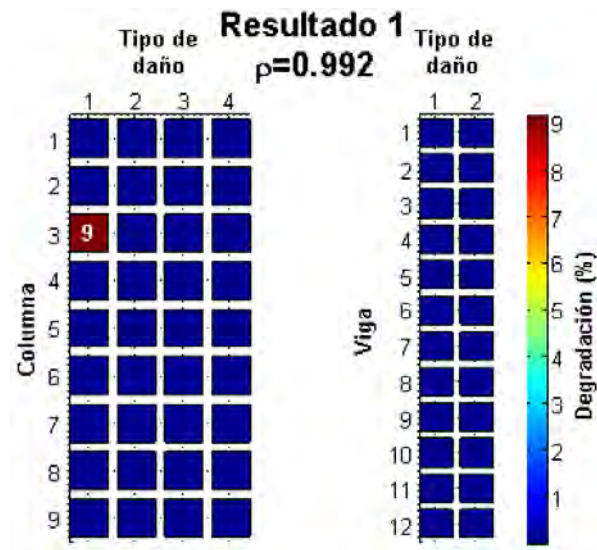
Una vez conocido el entrepiso dañado, se obtienen los vectores de unidaño para cada tipo de daño en cada columna y viga de dicho entrepiso. La matriz de daño es la misma que la obtenida para el ejemplo 1.

El vector de incremento de energía potencial $\{\Delta P\}$ desarrollada en cada columna del entrepiso dañado es el mostrado en la gráfica 5.28.



Gráfica 5.28. Vector de incremento de energía potencial por elemento $\{\Delta P\}$, ejemplo 3.

Aplicando la metodología propuesta, al utilizar un coeficiente de correlación mínimo de 0.99, sólo se obtiene un resultado con un caso de daño presente. Al convertir el vector de escalamiento a nivel de daño, y acomodando los resultados por elemento y tipo de daño, se tiene la gráfica 5.29.

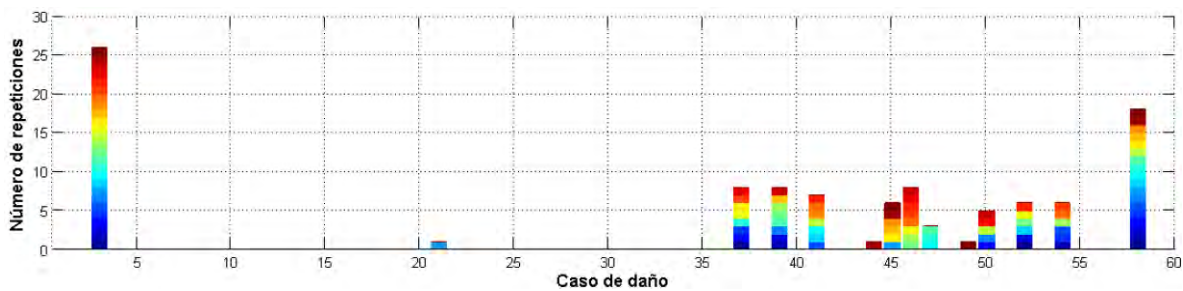


Gráfica 5.29. Elementos dañados detectados, ejemplo 3, resultado 1.

Al incrementar el coeficiente de correlación mínimo, se encontró que es necesario tomarlo igual a 0.999999 para poder detectar todos los tipos de daño en la estructura:

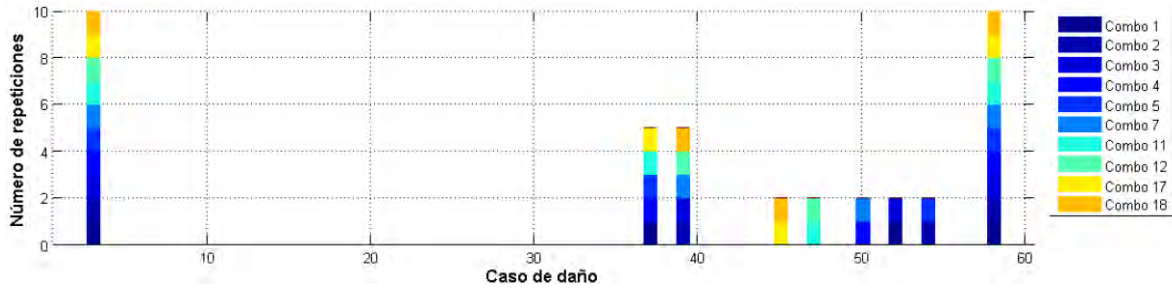
- Se necesita considerar que existen 4 casos de daño en la estructura:
 - 1 Caso de daño en columnas.
 - 3 Casos de daño en vigas.
- Se tienen 26 combinaciones diferentes que cumplen con el coeficiente mínimo.

Al graficar el acumulado de combinaciones de caso de daño, se tiene la gráfica 5.30.



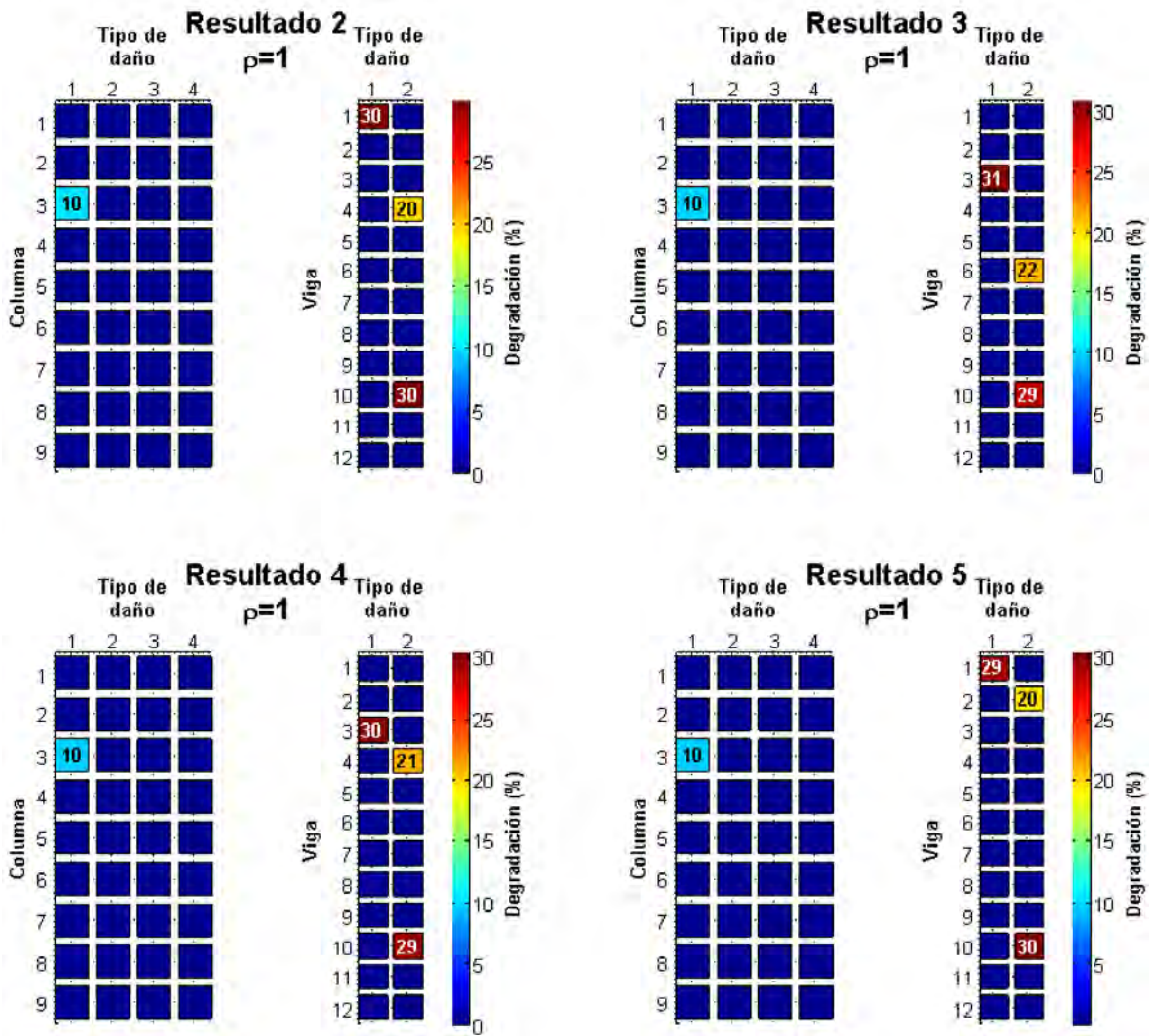
Gráfica 5.30. Acumulado de casos de daño, paso 2, ejemplo 3.

Si sólo se consideran aquellos casos de daño con mayor número de repeticiones, se tiene el siguiente acumulado resultante:



Gráfica 5.31. Acumulado reducido de casos de daño, paso 2, ejemplo 3.

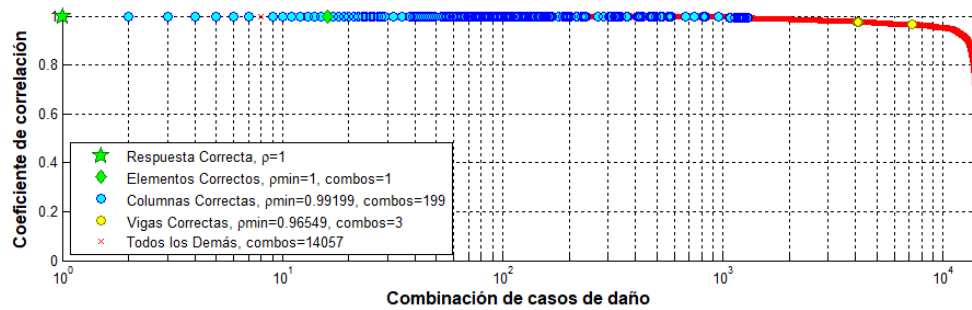
Al convertir los vectores de escalamiento a nivel de daño, y acomodando los resultados por elemento y tipo de daño (de las 4 combinaciones con mayor coeficiente de correlación) se tiene la gráfica 5.32.



Gráfica 5.32. Elementos dañados detectados, ejemplo 3, resultados 2 a 5.

El resultado 2 resulta ser la respuesta correcta para todos los casos de daño presentes, obteniendo niveles de degradación correctos (error máximo de 1%). Para los demás resultados, la metodología confunde las vigas dañadas, sin embargo, detectó el daño en las misma crujías en la que se encuentran las vigas dañadas (ver figura 10).

Al graficar todas las combinaciones (considerando el número de casos de daño simultáneos desde 1 y aumentando hasta encontrar la respuesta correcta) que resultaron con componentes positivas del vector de escalamiento contra su correspondiente coeficiente de correlación (ordenado de mayor a menor), se tiene la gráfica 5.33.



Gráfica 5.33. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 3.

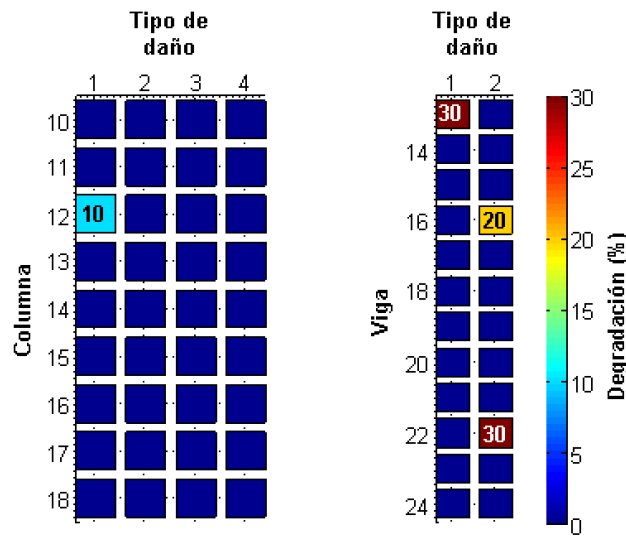
En la gráfica 5.33, (para el ejemplo considerado) se observa que la combinación con mayor coeficiente de correlación resulta ser el resultado correcto. De acuerdo a la misma, es posible detectar daño en columnas o vigas correctamente (pudiendo confundir el nodo dañado) si se utiliza un coeficiente de correlación mínimo de 0.99199.

5.5. Ejemplo 4, daño principal en vigas de entrepiso 2

Se retoma el ejemplo 3, reasignando los casos de daño al entrepiso 2, los cuales se muestran en la tabla 6 y la gráfica 5.34. La longitud dañada es del 5% de la longitud del elemento correspondiente. La configuración estructural del entrepiso 2 se muestra en la figura 11.

Tabla 6. Elementos dañados, ejemplo 4.

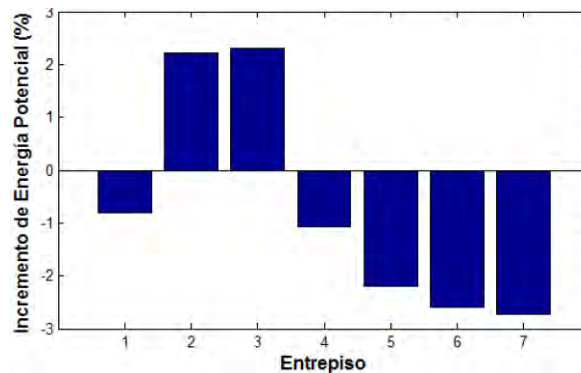
Tipo de elemento	Número de elemento	Tipo de daño	Nivel de degradación
Columna	12	1	10%
Viga	13	1	30%
	16	2	20%
	22	2	30%



Gráfica 5.34. Elementos dañados, ejemplo 4.

5.5.1. Paso 1, definición de entrepiso dañado

El vector de incremento de energía potencial $\{\Delta P\}$ obtenido a nivel entrepiso es el mostrado en la gráfica 5.35.

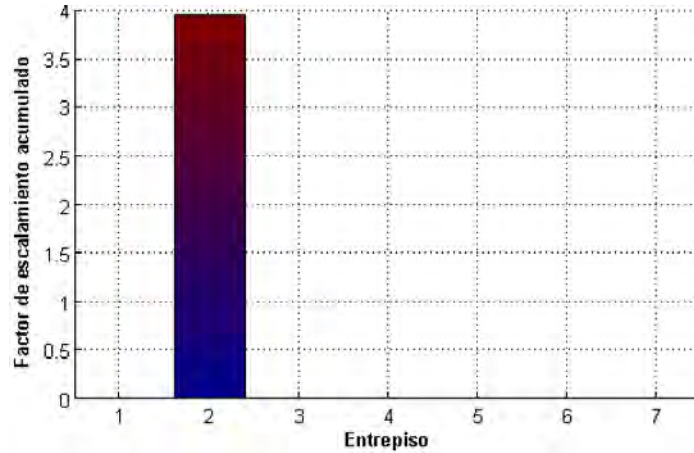


Gráfica 5.35. Vector de incremento de energía potencial por entrepiso $\{\Delta P\}$, ejemplo 4.

Al aplicar la metodología propuesta, utilizando un coeficiente de correlación mínimo de 0.99, se tiene lo siguiente:

- Se necesita considerar que se presenta 1 caso de daño en vigas.
- Se tienen 2 casos de daño que cumplen con el coeficiente de correlación mínimo.

Ambos casos de daño resultantes corresponden al mismo entrepiso. Si se toma cualquier caso y su vector de escalamiento $\{D\}$ se reacomoda su correspondiente entrepiso, se obtiene la gráfica 5.36.



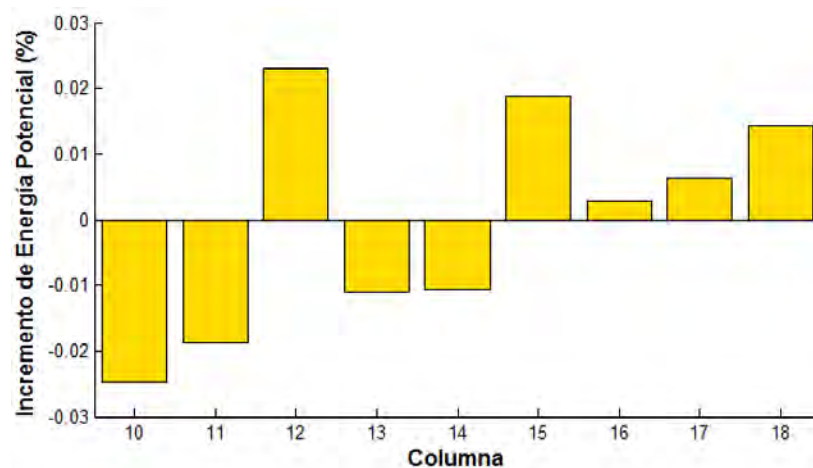
Gráfica 5.36. Entrepisos dañados, ejemplo 4.

De este paso, se concluye que el entrepiso dañado es el entrepiso 2.

5.5.2. Paso 2, definición de elementos dañados

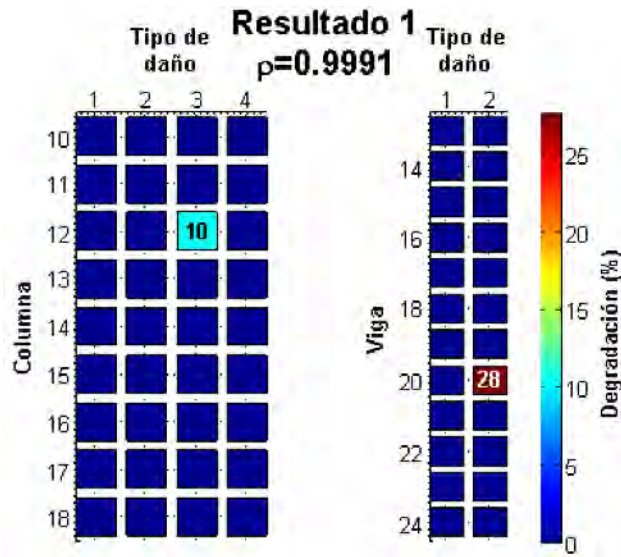
Una vez conocido el entrepiso dañado, se obtienen los vectores de unidano para cada tipo de daño en cada columna y viga de dicho entrepiso. La matriz de daño es la misma que la obtenida para el ejemplo 2.

El vector de incremento de energía potencial $\{\Delta P\}$ desarrollada en cada columna del entrepiso dañado es el mostrado en la gráfica 5.37.



Gráfica 5.37. Vector de incremento de energía potencial por elemento $\{\Delta P\}$, ejemplo 4.

Aplicando la metodología propuesta, al utilizar un coeficiente de correlación mínimo de 0.99, sólo se obtiene un resultado con un caso de daño presente. Al convertir el vector de escalamiento a nivel de daño, y acomodando los resultados por elemento y tipo de daño, se tiene la gráfica 5.38.

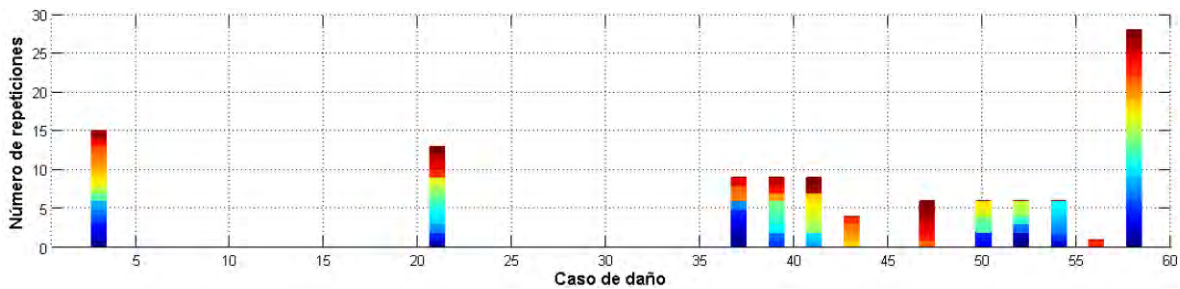


Gráfica 5.38. Elementos dañados detectados, ejemplo 4, resultado 1.

Si se considera un coeficiente de correlación mínimo de 0.9999 (mayor al obtenido en el resultado 1), se tiene lo siguiente:

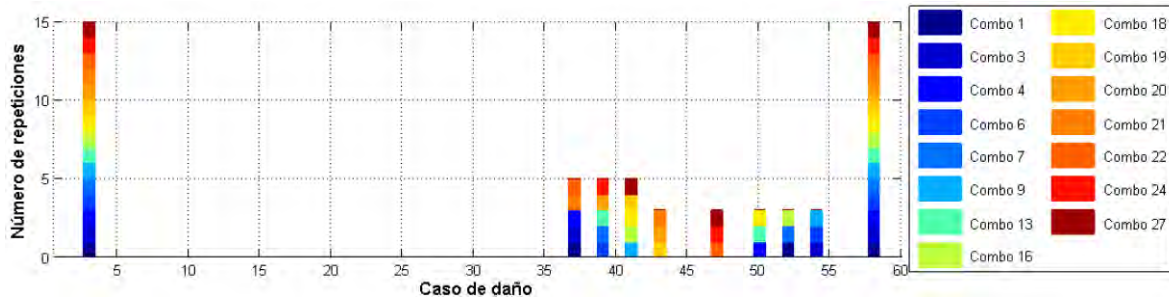
- Se necesita considerar que existen 4 casos de daño en la estructura:
 - 1 Caso de daño en columnas.
 - 3 Casos de daño en vigas.
- Se tienen 28 combinaciones diferentes que cumplen con el coeficiente mínimo.

Al graficar el acumulado de combinaciones de caso de daño, se tiene la gráfica 5.39.



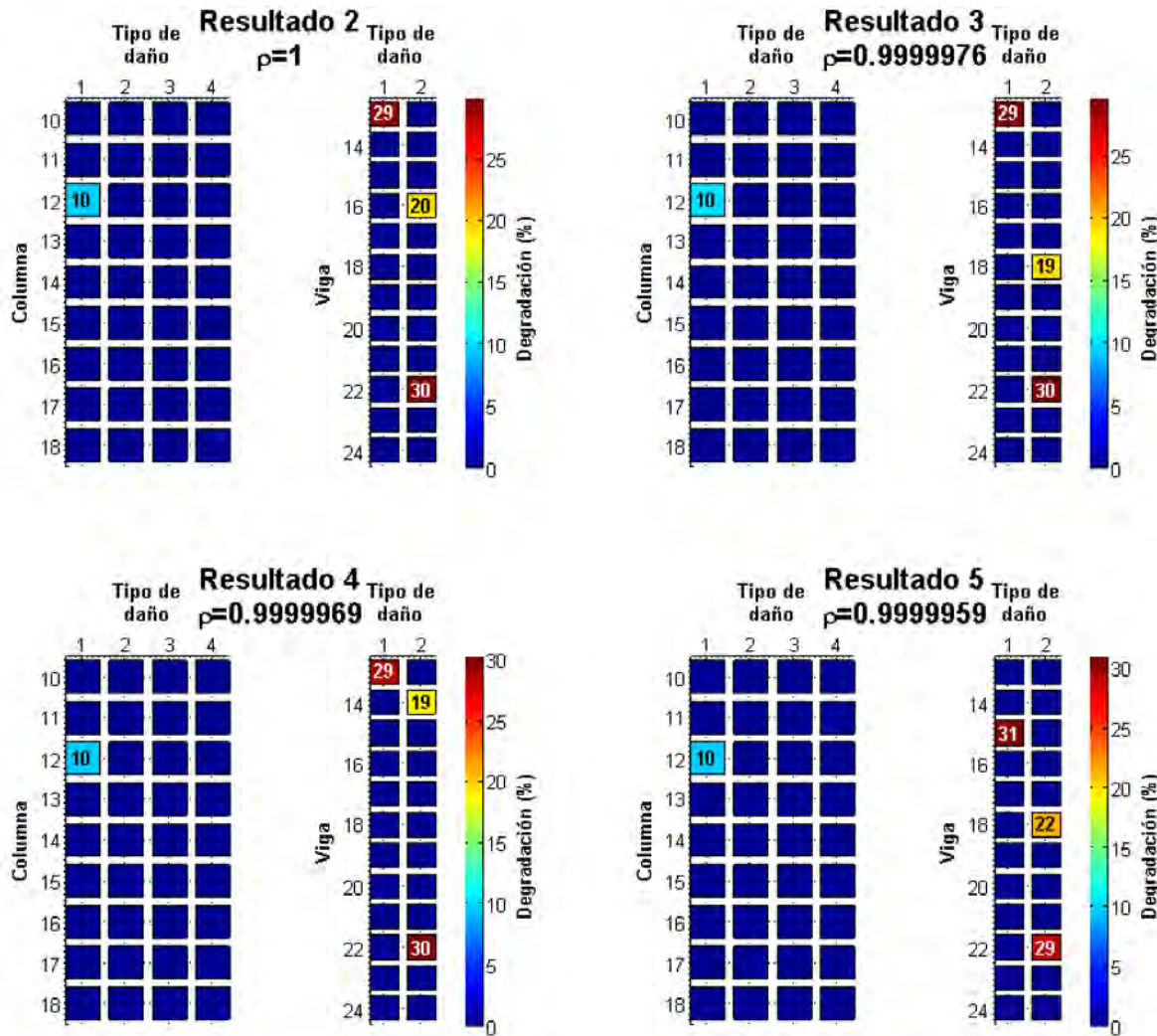
Gráfica 5.39. Acumulado de casos de daño, paso 2, ejemplo 4.

Si sólo se consideran aquellos casos de daño con mayor número de repeticiones, se tiene el siguiente acumulado resultante:



Gráfica 5.40. Acumulado reducido de casos de daño, paso 2, ejemplo 4.

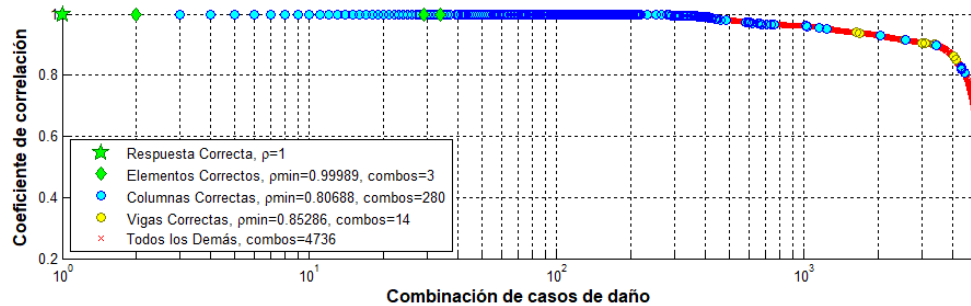
Al convertir los vectores de escalamiento a nivel de daño, y acomodando los resultados por elemento y tipo de daño (de las 4 combinaciones con mayor coeficiente de correlación) se tiene la gráfica 5.39.



Gráfica 5.41. Elementos dañados detectados, ejemplo 4, resultados 2 a 5.

El resultado 2 resulta ser la respuesta correcta para todos los casos de daño presentes, obteniendo niveles de degradación correctos (error máximo de 0.6%). Para los demás resultados, la metodología confunde las vigas dañadas, sin embargo, detecta el daño en las misma crujías en la que se encuentran las vigas dañadas (ver figura 11).

Al graficar todas las combinaciones (considerando el número de casos de daño simultáneos desde 1 y aumentando hasta encontrar la respuesta correcta) que resultaron con componentes positivas del vector de escalamiento contra su correspondiente coeficiente de correlación (ordenado de mayor a menor), se tiene la gráfica 5.42.



Gráfica 5.42. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 4.

En la gráfica 5.42, (para el ejemplo considerado) se observa que la combinación con mayor coeficiente de correlación resulta ser el resultado correcto. De acuerdo a la misma, es posible detectar daño en todos los elementos correctamente (pudiendo confundir el nodo dañado) si se utiliza un coeficiente de correlación mínimo de 0.99989.

Capítulo 6. Simulación experimental

En la práctica profesional, la aplicación de la metodología sólo será posible si se tiene conocimiento previo de las formas modales de la estructura (sin daño y con daño). Para el caso de la estructura sin daño, las formas modales pueden obtenerse a partir de un modelo analítico bien calibrado con datos experimentales. Sin embargo, para el caso de la estructura dañada, las propiedades dinámicas sólo pueden obtenerse experimentalmente.

Una metodología para la obtención de formas modales experimentalmente es el Algoritmo de Realización de Sistemas Característicos (*Eigensystem Realization Algorithm, ERA*, propuesto por Juang y Pappa en 1985).

6.1. Algoritmo de Realización de Sistemas Característicos (ERA)

Es un algoritmo que consiste en dos partes, la formulación básica de una realización (proceso de construir una representación de estados a partir de datos experimentales) de orden mínimo y la identificación de parámetros modales (Juang y Pappa, 1985). Por realización de orden mínimo se entiende un modelo con la menor dimensión de estado entre los sistemas realizados que tienen la misma relación entrada-salida dentro de un grado de exactitud especificado. Dentro de la formulación básica, la matriz de Hankel (matriz de respuesta) es generalizada para permitir una distribución aleatoria de los parámetros de Markov (funciones de respuesta ante impulsos) generados por la respuesta de vibración libre. A través del uso de la matriz de Hankel generalizada, se realiza un modelo lineal para un sistema dinámico haciendo coincidir la relación entre entrada y salida. El sistema realizado es entonces transformado a espacio modal para la identificación de parámetros modales. Como parte del ERA, existen dos indicadores para identificar los modos del sistema y los de ruido, estos indicadores son llamados coherencia de amplitud modal y la colinealidad de fase modal. En esta tesis sólo se hablará sobre la formulación básica.

6.1.1. Formulación básica

Un sistema dinámico finito, de tiempo discreto, lineal e invariante en el tiempo tiene las siguientes ecuaciones de variables de estado:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad \text{ec. 11}$$

$$y(k) = Cx(k) \quad \text{ec. 12}$$

donde:

- x = Vector de estado de “n” dimensiones.
- u = Entrada de control de “m” dimensiones.
- y = Salida o vector de medida de “p” dimensiones (respuesta del sistema).
- k = Indicador.
- A = Matriz de transición que caracteriza la dinámica del sistema (es una representación de la masa, rigidez y amortiguamiento).
- B = Matriz de entrada.
- C = Matriz de salida.

El problema de la realización del sistema es el siguiente: Dadas las funciones de medición $y(k)$, construir matrices constantes $[A, B, C]$ de tal forma que tales funciones son reproducidas por las ecuaciones de variables de estado. Pero todo sistema tiene un número infinito de realizaciones que puede predecir la misma respuesta para cualquier entrada.

Partiendo sobre el vector “u” para un impulso donde $u(k=0)=1$ y $u(k>0)=0$ y además la respuesta del sistema en el tiempo $k=0$ es $y(0)=0$, utilizando las ec. 11 y ec. 12 se obtienen los parámetros de Markov:

k	x(k)	y(k) (Parámetros de Markov)
0	0	0
1	B	CB
2	AB	CAB
3	A^2B	CA^2B
n	$A^{n-1}B$	$CA^{n-1}B$

Tabla 7. Parámetros de Markov.

Construyendo la matriz de Hankel de “r” filas y “s” columnas, para el tiempo “k”:

$$H_k = \begin{bmatrix} y_k & y_{1+k} & \cdots & y_{s-1+k} \\ y_{1+k} & y_{2+k} & \cdots & y_{s+k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{r-1+k} & y_{r+k} & \cdots & y_{r+s-1+k} \end{bmatrix} \quad \text{ec. 13}$$

Sustituyendo los parámetros de Markov en la matriz de Hankel para $k=1$:

$$H_1 = \begin{bmatrix} CB & CAB & \cdots & CA^{s-1}B \\ CAB & CA^2B & \cdots & CA^sB \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ CA^{r-1}B & CA^rB & \cdots & CA^{r+s-1}B \end{bmatrix} \quad \text{ec. 14}$$

Reescribiendo la ec. 14:

$$H_1 = V_r W_s \quad \text{ec. 15}$$

Donde V_r y W_s son llamadas las matrices de observabilidad y controlabilidad, respectivamente:

$$V_r = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^{r-1} \end{bmatrix} \quad \& \quad W_s = \begin{bmatrix} B & AB & \dots & A^{s-1}B \end{bmatrix} \quad \text{ec. 16}$$

De igual forma, para $k=2$ se puede demostrar que:

$$H_2 = V_r A W_s \quad \text{ec. 17}$$

Entonces, utilizando descomposición de valores singulares en la ec. 15:

$$H_1 = P D Q^T \quad \text{ec. 18}$$

A partir de la ec. 18 se llega a:

$$V_r = P D^{1/2} \quad \& \quad W_s = D^{1/2} Q^T \quad \text{ec. 19}$$

Sustituyendo las ec. 19 en la ec. 17 y despejando “A”:

$$A = D^{1/2} P^T H_2 Q D^{1/2} \quad \text{ec. 20}$$

Entonces, sea Ψ la matriz de vectores característicos de la matriz A. Sabiendo que A es una matriz de estado (Ψ son vectores de estado), utilizando la ec. 12 para transformar los vectores de estado (correspondientes a estados no físicos de la estructura) a formas modales de desplazamiento:

$$\Phi = C \Psi \quad \text{ec. 21}$$

donde:

- Φ = Matriz de formas modales del sistema.
- C = Matriz de salida.
- Ψ = Matriz de vectores característicos de la matriz A.

La formulación de ERA supone que el sistema se mueve en vibración libre, mientras que el lograr obtener este tipo de respuesta no siempre es posible. Por esto, la respuesta medida (la cual suele corresponder a vibración ambiental) debe ser procesada para poder ser utilizada en ERA.

6.2. Técnica de Decremento Aleatorio

El principio de esta técnica consiste en estimar funciones de decremento aleatorio promediando segmentos de tiempo de las mediciones, los cuales son seleccionados bajo ciertas condiciones (Asmussen, et al, 1998). De estas funciones, pueden obtenerse parámetros modales de la estructura medida usando métodos desarrollados para extraer tales parámetros de vibraciones libres.

6.2.1. Funciones de decremento aleatorio (funciones DA) y vibración libre

La respuesta desde el tiempo t_0 hasta $t_0 + t$ de una estructura sujeta a cargas estocásticas (aleatorias, por ejemplo vibración ambiental) consiste en dos partes:

- La respuesta a las condiciones iniciales (desplazamiento y velocidad) en el tiempo t_0 .
- La respuesta a las cargas estocásticas aplicadas desde el tiempo t_0 hasta el tiempo $t_0 + t$.

Si se toman segmentos de tiempo de la respuesta medida y son promediados, sólo quedará la parte correspondiente a las condiciones iniciales (vibración libre).

6.2.2. Estimación de las funciones de decremento aleatorio

Las funciones DA pueden estimarse con las siguientes ecuaciones:

$$D_{xx}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i + \tau) \Big| T_x \quad \text{ec. 22}$$

$$D_{yx}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(t_i + \tau) \Big| T_x \quad \text{ec. 23}$$

$$D_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i + \tau) \Big| T_y \quad \text{ec. 24}$$

$$D_{yy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(t_i + \tau) \Big| T_y \quad \text{ec. 25}$$

donde:

- $x(t)$ y $y(t)$ son las mediciones obtenidas de la estructura en distintos puntos.
- T_x y T_y son condiciones límite de disparo.
- N es el número de puntos en la medición que cumplen con la condición T_x o T_y .
- t_i es el punto en el tiempo “ i ” que cumple con la condición T_x o T_y .
- D_{xx} y D_{yy} son las funciones DA auto-relacionadas (la condición se genera con el registro promediado).
- D_{xy} y D_{yx} son las funciones DA de relación cruzada (la condición se genera con un registro diferente al promediado).

La estimación de estas funciones sólo involucra la detección de aquellos puntos en el registro que cumplan con la condición impuesta, y promediar todos los segmentos de tiempo obtenidos. La condición sólo es un requerimiento para extraer los segmentos de tiempo.

La condición general que se utiliza es la siguiente:

$$T_X^G = \{a_1 \leq x(t) \leq a_2\} \quad \text{ec. 26}$$

donde:

- T_X^G = Condición obtenida del registro “x”, los puntos detectados serán aquellos que se encuentren entre un límite inferior “ a_1 ” y un límite superior “ a_2 ”.
- a_1 = Límite inferior de la condición (de acuerdo a estudios realizados^{6,7}, se recomienda utilizar un valor igual a la desviación estándar del registro).
- a_2 = Límite superior de la condición (de acuerdo a estudios realizados^{6,7}, se recomienda utilizar un valor igual a infinito).

El número de puntos que cumplen con la condición, controlan el tiempo de cálculo y la precisión de la estimación.

Una vez obtenidas todas las funciones DA, se formará una matriz de respuesta de la siguiente forma:

$$y(\tau) = \begin{bmatrix} D_{XX}(\tau) & D_{XY}(\tau) \\ D_{YX}(\tau) & D_{YY}(\tau) \end{bmatrix} \quad \text{ec. 27}$$

En la matriz de la ec. 27, la diagonal corresponde a las funciones DA auto-relacionadas, mientras que las demás entradas corresponden a las funciones DA de relación cruzada.

6.3. Criterio de correlación modal (Modal Assurance Criterion, MAC)

Es una herramienta desarrollada para realizar comparaciones cuantitativas de vectores modales (Miroslav Pastor, et al, 2012). Ha sido utilizada como una constante de correlación entre formas modales para cuantificar la precisión de formas modales identificadas a partir de datos experimentales.

El MAC entre dos vectores modales se calcula mediante la siguiente expresión:

$$MAC(r, q) = \frac{|\{\phi_A\}_r^T \{\phi_X\}_q|^2}{(\{\phi_A\}_r^T \{\phi_A\}_r)(\{\phi_X\}_q^T \{\phi_X\}_q)} \quad \text{ec. 28}$$

donde:

- ϕ_A = Vector modal analítico.
- ϕ_X = Vector modal experimental.
- r, q = Forma modal “r” o “q”.

El MAC toma valores entre 0 (sin correspondencia) y 1 (correspondencia total entre modos).

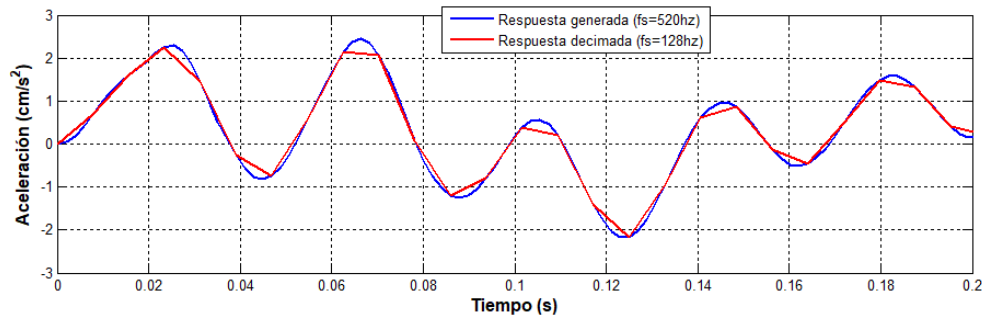
6.4. Procedimiento del análisis

Una vez obtenida la respuesta del sistema dañado ante alguna excitación, se procede a obtener las formas modales de interés a partir de los registros de respuesta generados. El parámetro con el cual se definen cuáles formas modales obtenidas corresponden a cada modo es el MAC.

El MAC, entre las formas modales del caso dañado y el caso sin daño, depende de la frecuencia de muestreo y el segmento de tiempo utilizado en ERA. Por esto, los registros deberán obtenerse a distintas frecuencias de muestreo (mediante decimación) y dividirse en ventanas de tiempo para ser analizados cada una independientemente. Con esto, se pueden encontrar formas modales más exactas para poder ser utilizadas en la metodología de detección de daño.

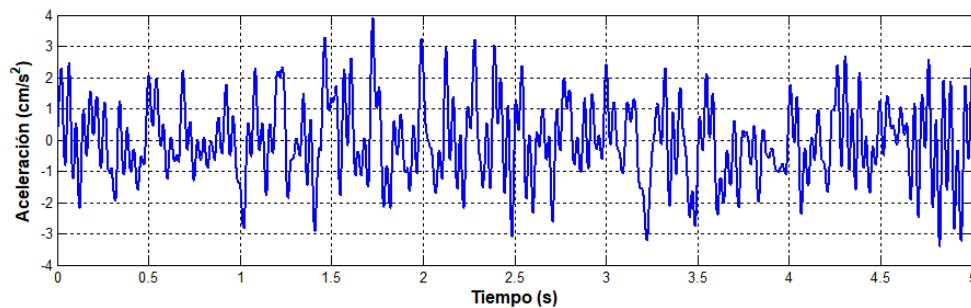
Por lo anterior, el procedimiento para obtener las formas modales más adecuadas es el siguiente:

1. Los registros generados se deciman en una magnitud, obteniendo la respuesta a diferentes frecuencias de muestreo.



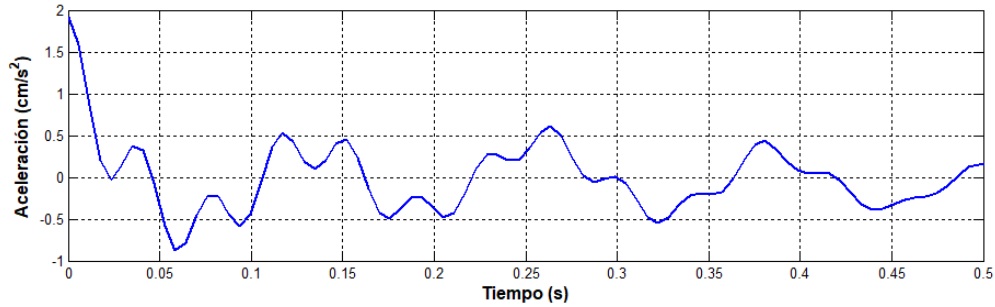
Gráfica 6.1. Ejemplo de decimación de la respuesta.

2. Dividir los registros en “n” segmentos de tiempo (Gráfica 6.2). Previamente se determina el efecto de usar distintas longitudes de segmentos de tiempo, y se encuentra que no tiene influencia importante en el resultado final.



Gráfica 6.2. Segmento de tiempo “i” de la respuesta en el punto “j”.

3. Definir una longitud de las funciones DA lo suficientemente grande para poder llenar la matriz de Hankel. Posteriormente aplicar la técnica de decrecimiento aleatorio a cada segmento para obtener las funciones DA (Gráfica 6.3).



Gráfica 6.3. Función DA de auto-relación del segmento “i” de la respuesta en el punto “j”.

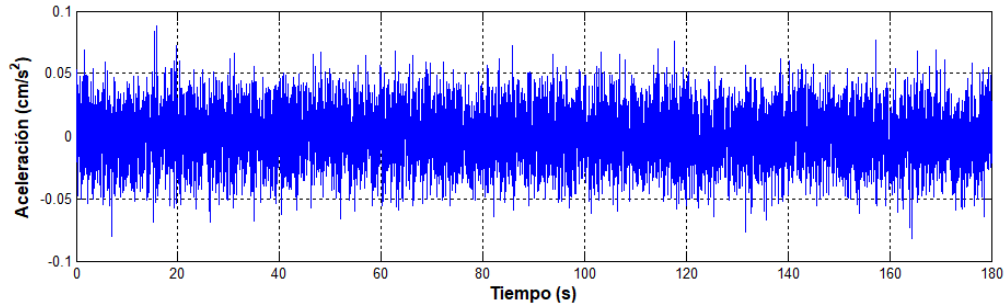
4. Aplicar ERA para obtener las formas modales para cada segmento de tiempo considerado. Aplicar el MAC entre las formas modales experimentales obtenidas (estructura dañada) y las formas modales analíticas de la estructura no dañada. Conservar las formas modales con mayor MAC.
5. Repetir los pasos 1 a 3, incrementando la decimación en 1 (Si así se requiera).
6. Aplicar la metodología de detección de daño modificada para definir los elementos dañados, partiendo que se conoce el entrepiso dañado.

Para la simulación, la estructura se somete a distintos tipos de excitaciones en su base. Posteriormente, se obtienen las formas modales de la estructura dañada al aplicar la metodología descrita anteriormente. Los parámetros a utilizados son los siguientes:

- Decimaciones desde 1 hasta 10, de 1 en 1.
- Segmentos de tiempo de 5 segundos, con un desfase de 2.5 segundos entre cada segmento.
- Para la matriz de Hankel, valores de $s=50$ y $r=25$.
- Debido a limitaciones computacionales, la respuesta se obtiene con un delta de tiempo de 0.00195 segundos (aproximadamente 1/7 del periodo de vibrar del 6to modo traslacional), correspondiente a una frecuencia de muestreo (fs) de 512 Hz.
- Se supone que la estructura tiene 5% de amortiguamiento en el 1er y 6to modo traslacional.
- La matriz de amortiguamiento se calcula con el criterio de Rayleigh.

6.5. Vibración ambiental

El registro (Gráfica 6.4) es simulado con un registro de ruido blanco generado en simulink (MatLab), con un tiempo de muestreo de 0.02 segundos y una duración de 3 minutos.



Gráfica 6.4. Excitación ambiental.

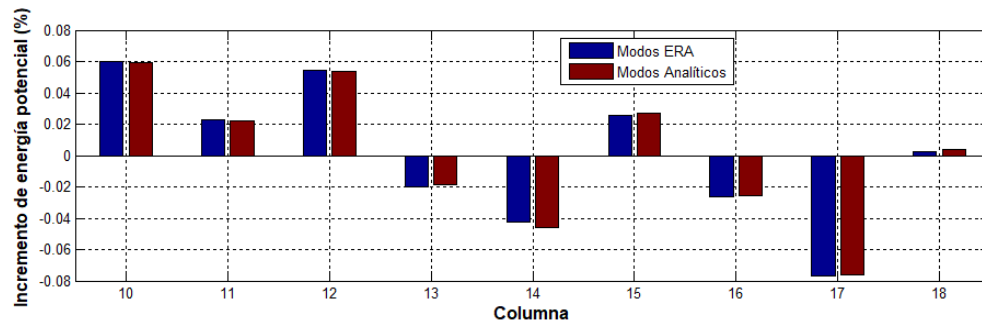
6.5.1. Ejemplo 2, daño principal en columnas de entrepiso 2

Al aplicar el procedimiento descrito en el capítulo 6.4, se obtienen los resultados de la tabla 8.

Tabla 8. Error MAC, vibración ambiental, ejemplo 2.

Modo Traslacional	Error MAC (1-MAC)	Sección de tiempo (s)		Decimación	
		T inicial	T final	Absoluta	Fs (Hz)
1	6E-06	62.5	67.5	5	102.4
2	5E-07	115.0	120.0	5	102.4
3	1E-06	110.0	115.0	7	73.1
4	1E-06	50.0	55.0	1	512.0
5	2E-06	142.5	147.5	1	512.0
6	2E-08	135.0	140.0	3	170.7

Al calcular el vector de incremento de energía $\{\Delta P\}$ con las formas modales obtenidas, y comparándolo con el vector $\{\Delta P\}$ al usar las formas modales analíticas, se obtiene la gráfica 6.5.



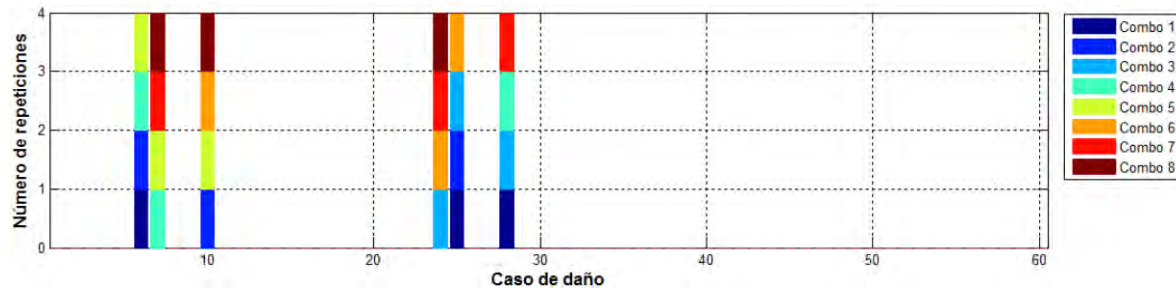
Gráfica 6.5. $\{\Delta P\}$ utilizando modos obtenidos con ERA vs modos analíticos, vibración ambiental, ejemplo 2.

En la gráfica 6.5 se observa que ambos vectores $\{\Delta P\}$ son similares (el coeficiente de correlación entre ellos es de 0.9994). Por esto, se espera que la aproximación sea lo suficientemente exacta para poder detectar daño correctamente al menos en columnas.

Al aplicar la metodología propuesta de detección de daño, asignando un coeficiente de correlación mínimo de 0.99, se tiene lo siguiente:

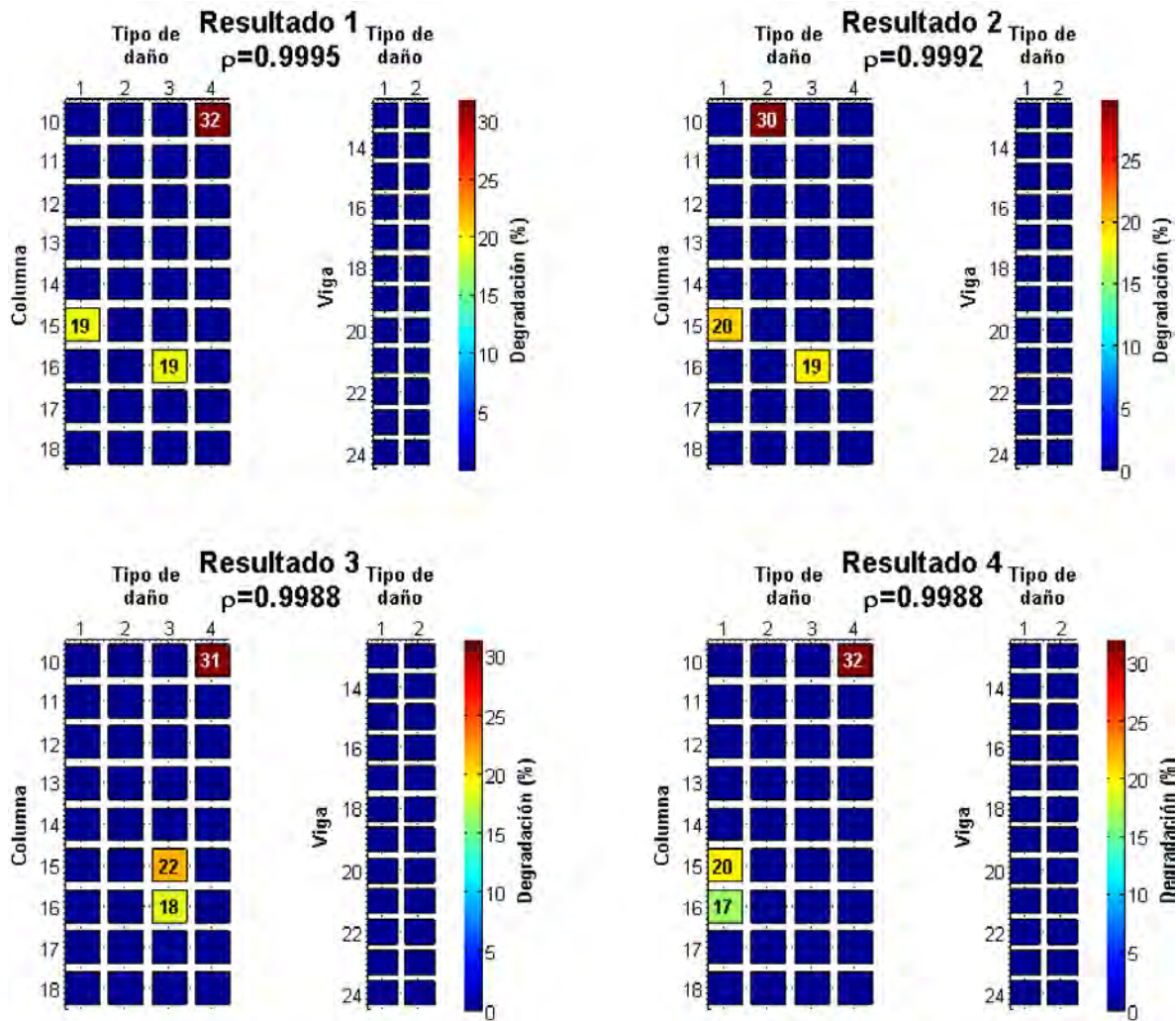
- Se necesita considerar que existen 3 casos de daño en la estructura.
- Se tienen 8 combinaciones diferentes que cumplen con el coeficiente mínimo.

El acumulado de combinaciones de casos de daño se presenta en la gráfica 6.6.



Gráfica 6.6. Acumulado de casos de daño, vibración ambiental, ejemplo 2.

Al convertir los vectores de escalamiento a nivel de daño, y al acomodar los resultados por elemento y tipo de daño (de las 4 combinaciones con mayor coeficiente de correlación) se obtiene la gráfica 6.7.



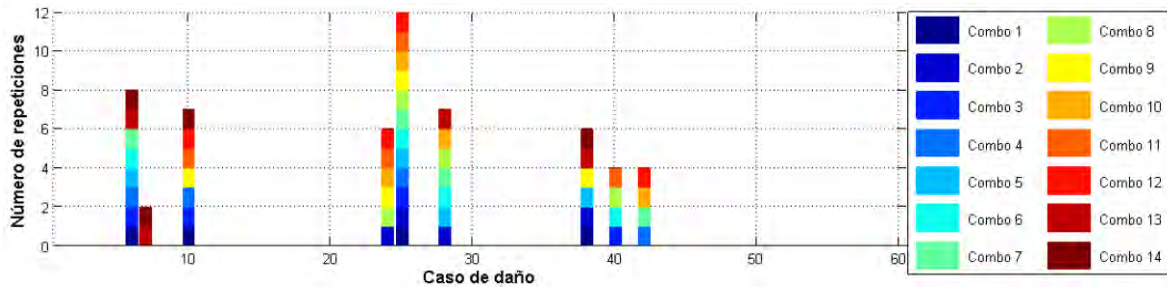
Gráfica 6.7. Elementos dañados detectados, vibración ambiental, ejemplo 2, resultados 1 a 4.

No es posible detectar daño en vigas con el coeficiente de correlación mínimo utilizado. Sin embargo, a pesar de obtenerse múltiples resultados, todos ellos incluyen a los mismos elementos, únicamente confundiendo el nodo dañado (superior o inferior). Es posible detectar todos los tipos de daño presentes en las columnas. El error máximo obtenido fue de 3%.

Al considerar un coeficiente de correlación mínimo de 0.9999 (mayor al máximo coeficiente encontrado del análisis anterior), se obtiene lo siguiente:

- Se necesita considerar que existen 4 casos de daño en la estructura.
 - 3 Casos correspondientes a daño en columnas (en promedio).
 - 1 Caso correspondiente a daño en vigas (en promedio).
- Se tienen 14 combinaciones diferentes que cumplen con el coeficiente mínimo.

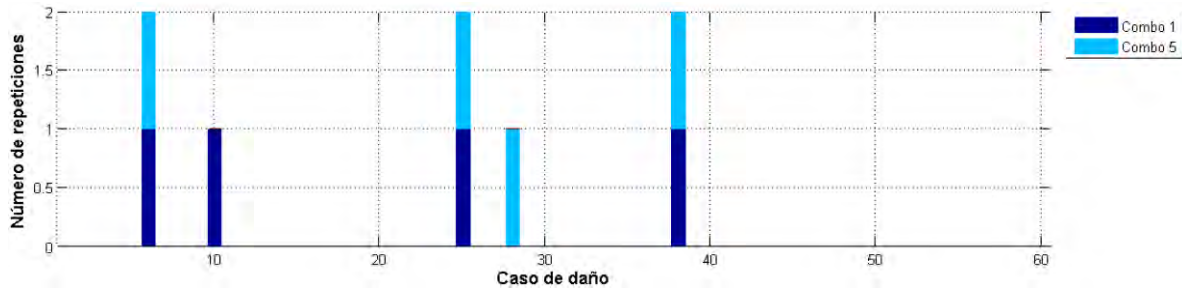
En la gráfica 6.8 se presenta el acumulado de casos de daño.



Gráfica 6.8. Acumulado de casos de daño, vibración ambiental, ejemplo 2, coeficiente aumentado.

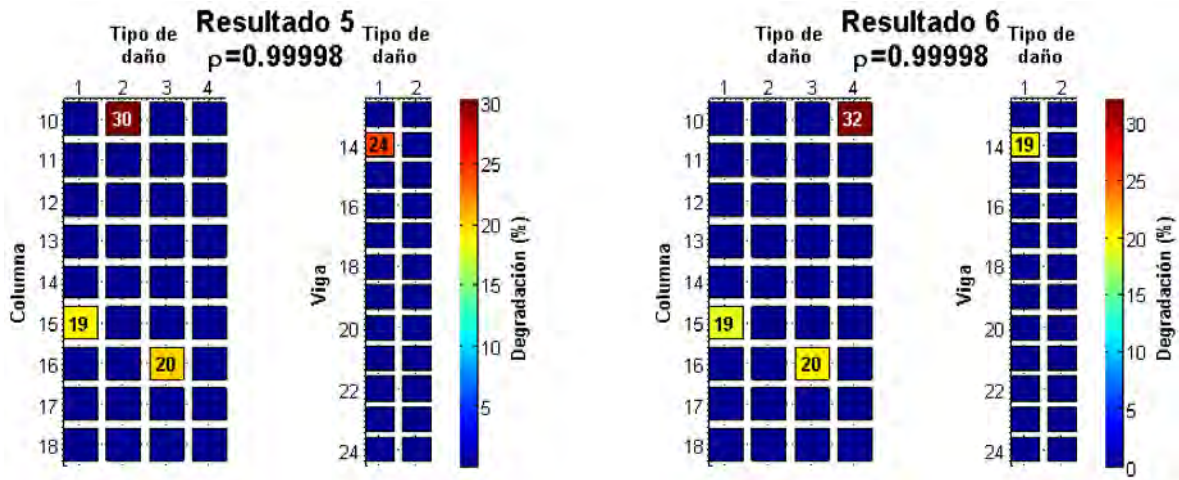
Se sabe que se necesitan 3 casos de daño en columnas. Por lo que sólo se consideran aquellas combinaciones que incluyan a los 2 casos con más repeticiones y los 2 casos con el 3er mayor número de repeticiones (2 casos se repiten igualmente). Además, es necesario considerar un caso de daño en vigas, por lo que sólo se consideran aquellas combinaciones que incluyan el caso de daño en vigas más repetido. Siempre hay que tomar en cuenta que los casos resultantes sean compatibles (deben existir combinaciones que incluyan tales casos).

En la gráfica 6.9 se presenta el nuevo acumulado de casos de daño.



Gráfica 6.9. Acumulado reducido de casos de daño, vibración ambiental, ejemplo 2, coeficiente aumentado.

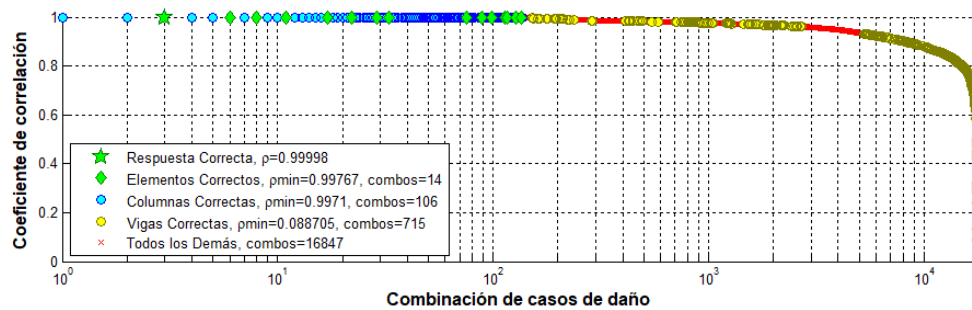
Al convertir los vectores de escalamiento (de las combinaciones resultantes del paso anterior) a nivel de daño, y acomodando los resultados por elemento y tipo de daño, se tiene la gráfica 6.10.



Gráfica 6.10. Elementos dañados detectados, vibración ambiental, ejemplo 2, resultados 5 y 6.

De estos últimos resultados, todos aciertan en las columnas dañadas, únicamente confundiendo el nodo dañado de la columna 10, además con un nivel de daño bastante aproximado (error máximo de 2%). En el caso de las vigas, todas las combinaciones confunden la viga dañada a una ubicada paralelamente en la misma crujía de la viga dañada. Además de sobreestimar su nivel de daño hasta en un 14%.

Al graficar todas las combinaciones (considerando el número de casos de daño simultáneos desde 1 y aumentando hasta encontrar la respuesta correcta) que resultaron con componentes positivas del vector de escalamiento contra su correspondiente coeficiente de correlación (ordenado de mayor a menor), se tiene la gráfica 6.11.



Gráfica 6.11. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 2, vibración ambiental.

En la gráfica 6.11, (para el ejemplo considerado) se observa que la combinación con mayor coeficiente de correlación no resulta ser el resultado correcto. De acuerdo a la misma, es posible detectar daño todos los elementos correctamente (pudiendo confundir el nodo dañado) si se utiliza un coeficiente de correlación mínimo de 0.99767. Sin embargo, al utilizar este coeficiente sólo se puede detectar daño en 3 de 4 elementos dañados (se necesitan coeficientes mayores a 0.9999, de acuerdo al ejemplo realizado).

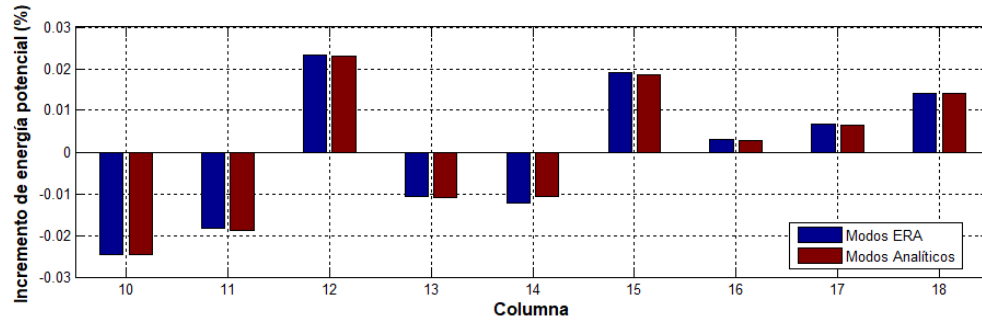
6.5.2. Ejemplo 4, daño principal en vigas de entrespiso 2

Al aplicar el procedimiento descrito en el capítulo 6.4, se obtienen los resultados de la tabla 9.

Tabla 9. Error MAC, vibración ambiental, ejemplo 4.

Modo Traslacional	Error MAC (1-MAC)	Sección de tiempo (s)		Decimación	
		T inicial	T final	Absoluta	Fs (Hz)
1	6E-06	62.5	67.5	5	102.4
2	5E-07	115.0	120.0	5	102.4
3	1E-06	110.0	115.0	7	73.1
4	1E-06	50.0	55.0	1	512.0
5	2E-06	142.5	147.5	1	512.0
6	2E-08	135.0	140.0	3	170.7

Al calcular el vector de incremento de energía $\{\Delta P\}$ con las formas modales obtenidas, y comparándolo con el vector $\{\Delta P\}$ al usar las formas modales analíticas, se obtiene la gráfica 6.12.



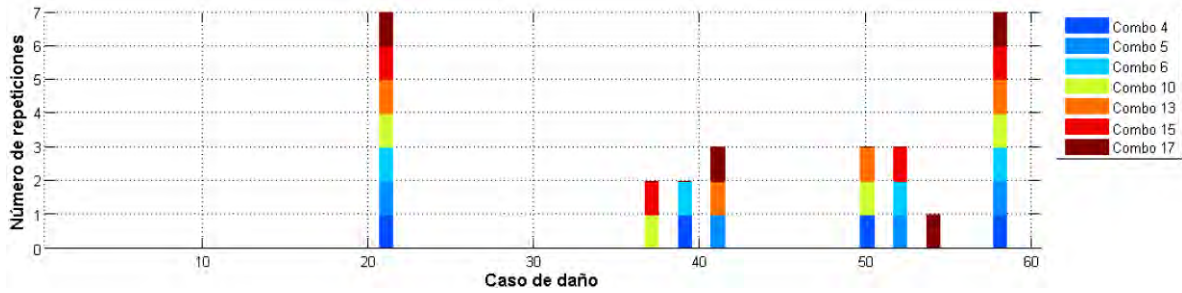
Gráfica 6.12. $\{\Delta P\}$ utilizando modos obtenidos con ERA vs modos analíticos, vibración ambiental, ejemplo 4.

En la gráfica 6.12 se observa que ambos vectores $\{\Delta P\}$ son similares (coeficiente de correlación entre ellos de 0.9993).

Al aplicar la metodología propuesta de detección de daño, definiendo un coeficiente de correlación mínimo de 0.9999, se obtiene lo siguiente:

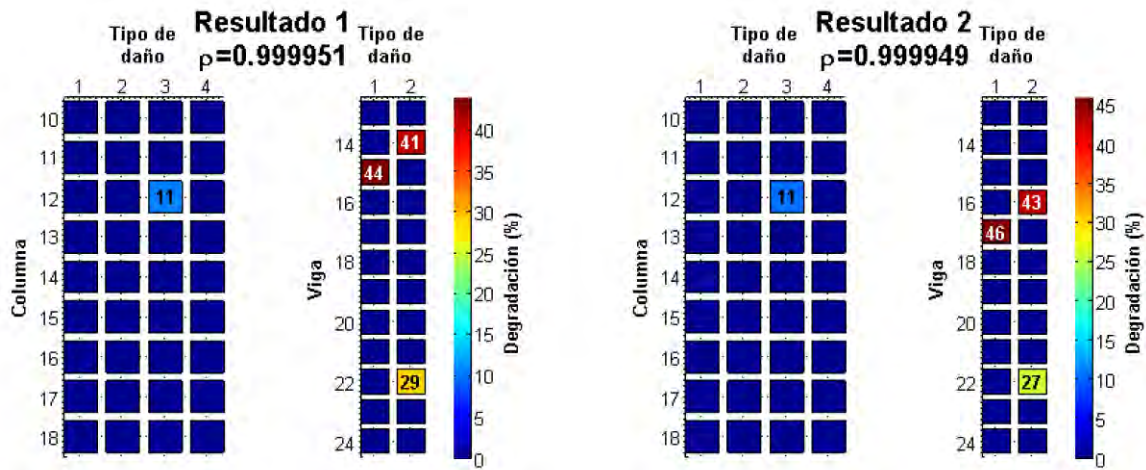
- Se necesita considerar que existen 4 casos de daño en la estructura.
 - 1 Caso correspondiente a daño en columnas (en promedio).
 - 3 Casos correspondientes a daño en vigas (en promedio).
- Se tienen 17 combinaciones diferentes que cumplen con el coeficiente mínimo.

En la gráfica 6.13 se presenta el acumulado reducido de casos de daño una vez tomadas las consideraciones de los ejemplos anteriores.



Gráfica 6.13. Acumulado reducido de casos de daño, vibración ambiental, ejemplo 4.

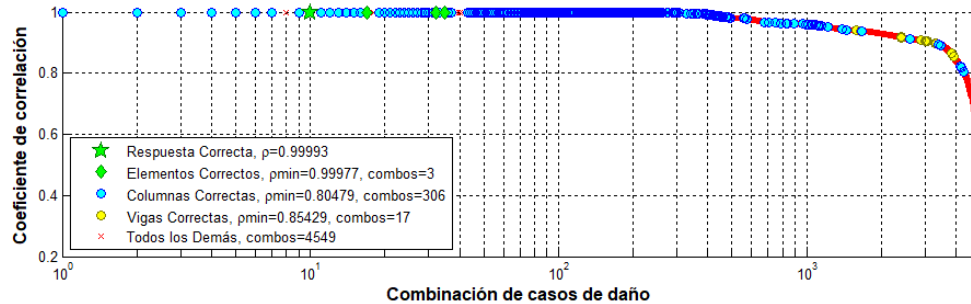
Al convertir los vectores de escalamiento (de las 2 combinaciones resultantes con mayor coeficiente de correlación del paso anterior) a nivel de daño, y acomodando los resultados por elemento y tipo de daño, se tiene la gráfica 6.14.



Gráfica 6.14. Elementos dañados detectados, vibración ambiental, ejemplo 4.

Al igual que en los ejemplos 2 y 3, la metodología acierta en la columna dañada, únicamente confundiendo el nodo dañado, con un nivel de daño bastante aproximado (error máximo de 1%). Todas las combinaciones confunden al menos 2 de las 3 vigas dañadas. Además de sobreestimar su nivel de daño hasta en un 26%.

Al graficar todas las combinaciones (considerando el número de casos de daño simultáneos desde 1 y aumentando hasta encontrar la respuesta correcta) que resultaron con componentes positivas del vector de escalamiento contra su correspondiente coeficiente de correlación (ordenado de mayor a menor), se tiene la gráfica 6.15.

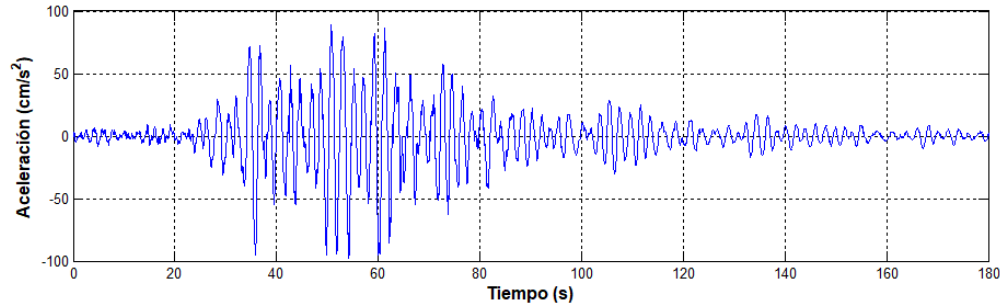


Gráfica 6.15. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 4, vibración ambiental.

En la gráfica 6.15, (para el ejemplo considerado) se observa que la combinación con mayor coeficiente de correlación no resulta ser el resultado correcto. De acuerdo a la misma, es posible detectar daño todos los elementos correctamente (pudiendo confundir el nodo dañado) si se utiliza un coeficiente de correlación mínimo de 0.99977. Sin embargo, al utilizar este coeficiente sólo se puede detectar daño en 3 de 4 elementos dañados (se necesitan coeficientes mayores a 0.9999, de acuerdo al ejemplo realizado).

6.6. Vibración forzada

El registro a utilizar para la simulación de vibración forzada es el obtenido en SCT en Septiembre de 1985, componente N-S (Gráfica 6.16). Se decide recurrir a este registro con el motivo de revisar el funcionamiento de la metodología ante excitaciones de tipo diferentes a la estocástica.



Gráfica 6.16. Excitación forzada.

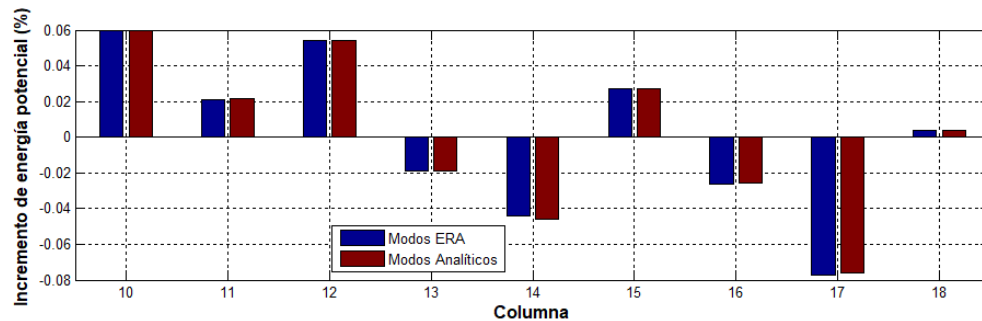
6.6.1. Ejemplo 2, daño principal en columnas de entrepiso 2

Al aplicar el procedimiento descrito en el capítulo 6.4, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 10.

Tabla 10. Error MAC, vibración forzada, ejemplo 2.

Modo Traslacional	Error MAC (1-MAC)	Sección de tiempo (s)		Decimación	
		T inicial	T final	Absoluta	Fs (Hz)
1	9E-06	132.5	137.5	4	128
2	2E-06	87.5	92.5	5	102.4
3	9E-06	122.5	127.5	4	128
4	6E-09	27.5	32.5	2	256
5	2E-07	107.5	112.5	5	102.4
6	2E-07	145.0	150.0	2	256

Al comparar el vector $\{\Delta P\}$ calculado con las formas modales obtenidas con ERA contra formas modales analíticas, se tiene la gráfica 6.17.



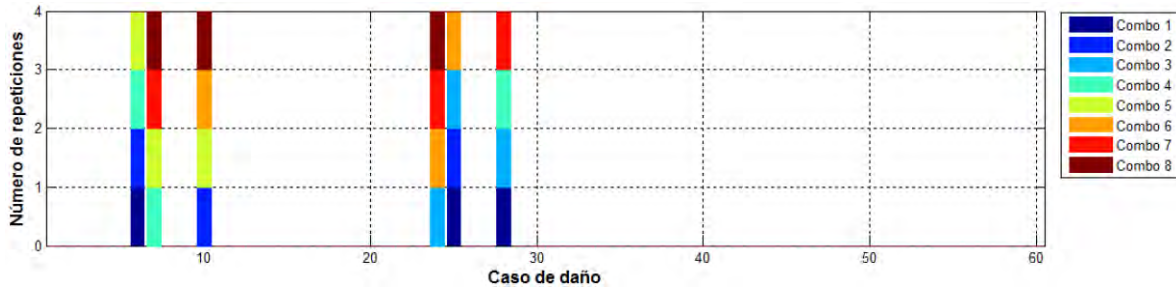
Gráfica 6.17. $\{\Delta P\}$ utilizando modos obtenidos con ERA vs modos analíticos, vibración forzada, ejemplo 2.

En la gráfica 6.17 se observa que ambos vectores $\{\Delta P\}$ son similares (coeficiente de correlación entre ellos de 0.9999).

Aplicando la metodología propuesta de detección de daño, asignando un coeficiente de correlación mínimo de 0.99, se tiene lo siguiente:

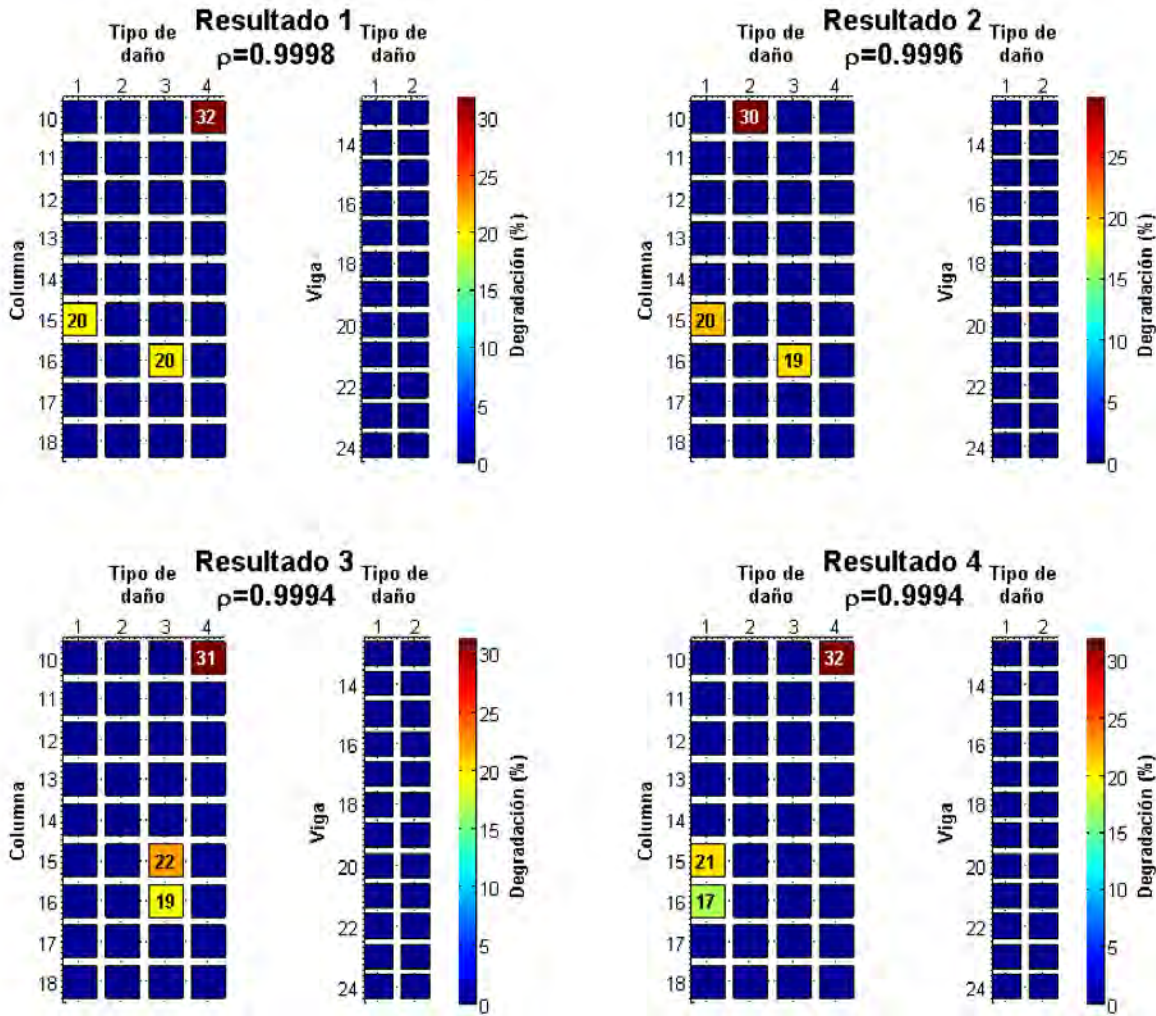
- Se necesita considerar que existen 3 casos de daño en la estructura.
- Se tienen 8 combinaciones diferentes que cumplen con el coeficiente mínimo.

El acumulado de combinaciones de casos de daño se presenta en la gráfica 6.18, la cual resulta ser idéntica a la obtenida en el capítulo de vibración ambiental.



Gráfica 6.18. Acumulado de casos de daño, vibración forzada, ejemplo 2.

Al convertir los vectores de escalamiento a nivel de daño y acomodando los resultados por elemento y tipo de daño (de las 4 combinaciones con mayor coeficiente de correlación) se tiene la gráfica 6.19.



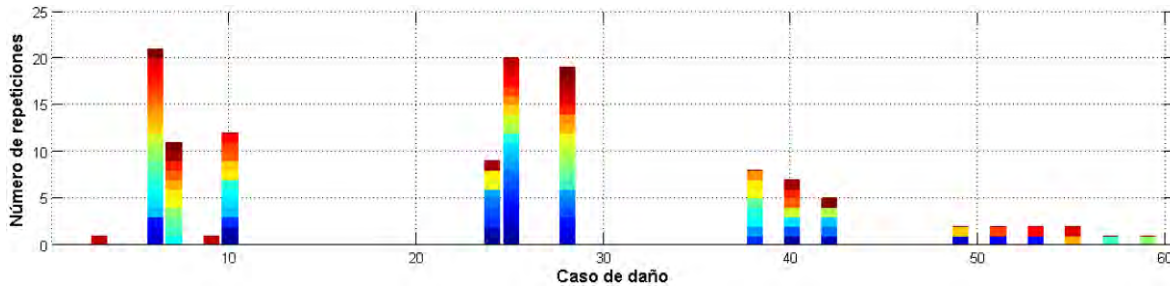
Gráfica 6.19. Elementos dañados detectados, vibración forzada, ejemplo 2, resultados 1 a 4.

En este análisis no es posible detectar daño en vigas. Sin embargo, a pesar de obtenerse múltiples resultados, todos ellos incluyen a los mismos elementos, únicamente confundiendo el nodo dañado. Es posible detectar todos los tipos de daño presentes en las columnas. El error máximo encontrado en el nivel de daño fue de 3%.

Al considerar un coeficiente de correlación mínimo de 0.9999 (mayor al máximo coeficiente encontrado del análisis anterior), se obtiene lo siguiente:

- Se necesita considerar que existen 4 casos de daño en la estructura.
 - 3 Casos correspondientes a daño en columnas (en promedio).
 - 1 Caso correspondiente a daño en vigas (en promedio).
- Se tienen 31 combinaciones diferentes que cumplen con el coeficiente mínimo.

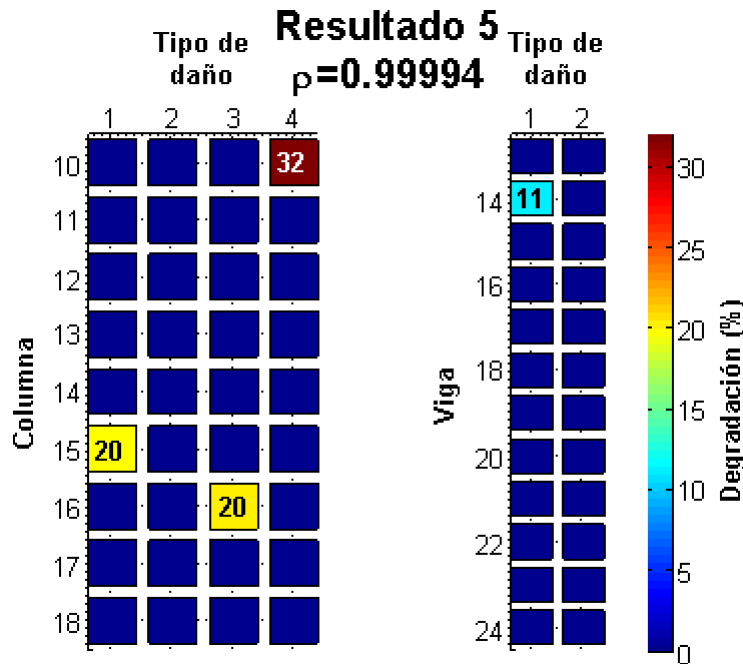
En la gráfica 6.20 se presenta el acumulado de casos de daño.



Gráfica 6.20. Acumulado de casos de daño, vibración forzada, coeficiente aumentado, ejemplo 2.

Se sabe que se necesitan 3 casos de daño en columnas, por lo que sólo se consideran aquellas combinaciones que incluyan a los 3 casos con mayor número de repeticiones. Además, se conoce que es necesario considerar un caso de daño en vigas, por lo que sólo se consideran aquellas combinaciones que incluya el caso de daño en viga más repetido.

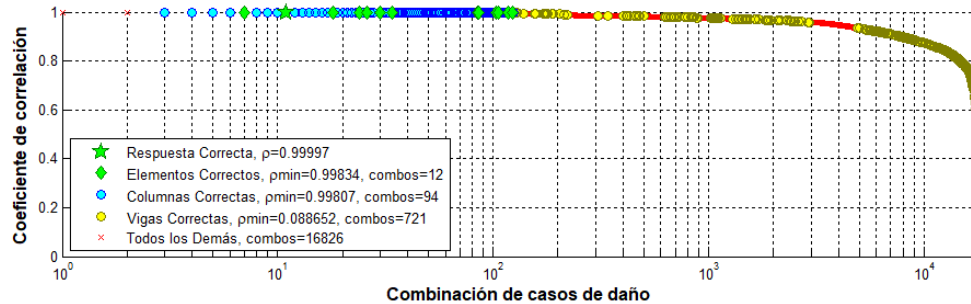
Con lo anterior, sólo resulta en una combinación de daño. Al convertir el vector de escalamiento de dicha combinación a nivel de daño, y acomodando los resultados por elemento y tipo de daño, se tiene la gráfica 6.21.



Gráfica 6.21. Elementos dañados detectados, vibración forzada, ejemplo 2, resultado 5.

De este último resultado, se observa que el daño detectado acierta en todas las columnas, únicamente confundiendo el nodo dañado de la columna 10. En el caso de las vigas, se pudo detectar daño, confundiendo el elemento dañado a uno ubicado paralelamente en la misma crujía de la viga dañada. Todos los niveles de daño detectados fueron correctos (error máximo de 2%).

Al graficar todas las combinaciones (considerando el número de casos de daño simultáneos desde 1 y aumentando hasta encontrar la respuesta correcta) que resultaron con componentes positivas del vector de escalamiento contra su correspondiente coeficiente de correlación (ordenado de mayor a menor), se tiene la gráfica 6.22.



Gráfica 6.22. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 2, vibración forzada.

En la gráfica 6.22, (para el ejemplo considerado) se observa que la combinación con mayor coeficiente de correlación no resulta ser el resultado correcto. De acuerdo a la misma, es posible detectar daño todos los elementos correctamente (pudiendo confundir el nodo dañado) si se utiliza un coeficiente de correlación mínimo de 0.99834. Sin embargo, al utilizar este coeficiente sólo se puede detectar daño en 3 de 4 elementos dañados (se necesitan coeficientes mayores a 0.9999, de acuerdo al ejemplo realizado).

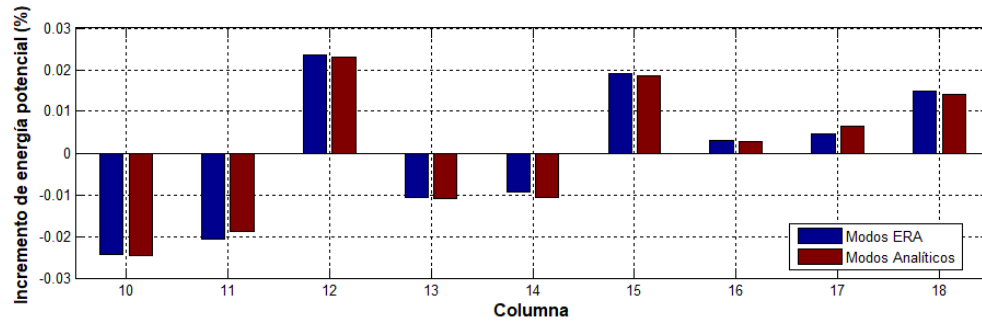
6.6.2. Ejemplo 4, daño principal en vigas de entrespiso 2

Al aplicar el procedimiento descrito en el capítulo 6.4, se obtienen los resultados de la tabla 11.

Tabla 11. Error MAC, vibración forzada, ejemplo 4.

Modo Traslacional	Error MAC (1-MAC)	Sección de tiempo (s)		Decimación	
		T inicial	T final	Absoluta	Fs (Hz)
1	1E-05	125.0	130.0	7	73.1
2	3E-06	7.5	12.5	3	170.7
3	8E-06	122.5	127.5	1	512.0
4	1E-06	70.0	75.0	8	64.0
5	2E-06	127.5	132.5	2	256.0
6	2E-07	10.0	15.0	3	170.7

Al calcular el vector de incremento de energía $\{\Delta P\}$ con las formas modales obtenidas, y comparándolo con el vector $\{\Delta P\}$ al usar las formas modales analíticas, se obtiene la gráfica 6.23.



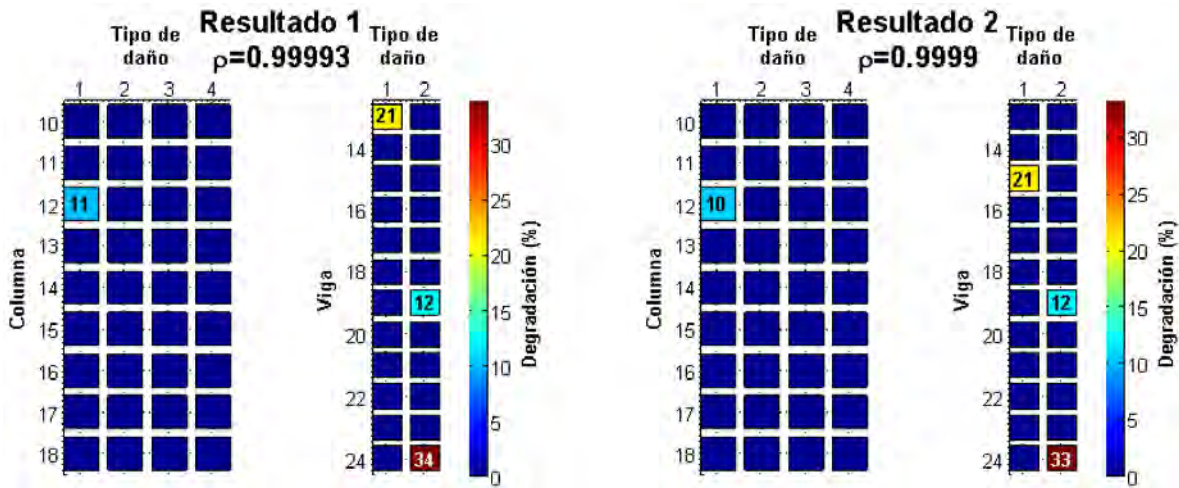
Gráfica 6.23. $\{\Delta P\}$ utilizando modos obtenidos con ERA vs modos analíticos, vibración forzada, ejemplo 4.

En la gráfica 6.23 se observa que ambos vectores $\{\Delta P\}$ son similares (coeficiente de correlación entre ellos de 0.998).

Al aplicar la metodología propuesta de detección de daño, definiendo un coeficiente de correlación mínimo de 0.9999, se obtiene lo siguiente:

- Se necesita considerar que existen 4 casos de daño en la estructura.
 - 1 Caso correspondiente a daño en columnas (en promedio).
 - 3 Casos correspondientes a daño en vigas (en promedio).
- Se tienen 2 combinaciones diferentes que cumplen con el coeficiente mínimo.

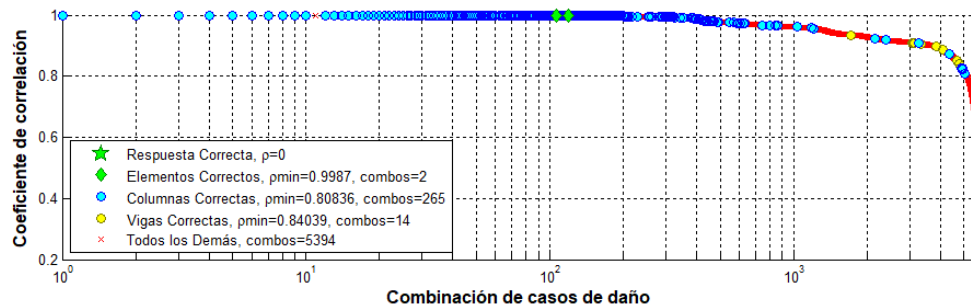
Al convertir los vectores de escalamiento a nivel de daño, y acomodando los resultados por elemento y tipo de daño, se tiene la gráfica 6.24.



Gráfica 6.24. Elementos dañados detectados, vibración forzada, ejemplo 4.

La metodología acierta en la columna dañada, con un nivel de daño bastante aproximado (error máximo de 1%). Todas las combinaciones confunden al menos 1 de las 3 vigas dañadas. Además de subestimar su nivel de daño hasta en un 9%.

Al graficar todas las combinaciones (considerando el número de casos de daño simultáneos desde 1 hasta 4, sabiendo que existen 4 casos de daño en la estructura) que resultaron con componentes positivas del vector de escalamiento contra su correspondiente coeficiente de correlación (ordenado de mayor a menor), se tiene la gráfica 6.25.



Gráfica 6.25. Coeficiente de correlación vs combinación, ejemplo 4, vibración forzada.

En la gráfica 6.25, (para el ejemplo considerado) se observa que no fue posible encontrar la respuesta correcta (todos los elementos con el tipo de daño correcto). De acuerdo a la misma, es posible detectar daño todos los elementos correctamente (pudiendo confundir el nodo dañado) si se utiliza un coeficiente de correlación mínimo de 0.9987. Sin embargo, al utilizar este coeficiente sólo se puede detectar daño en 3 de 4 elementos dañados (se necesitan coeficientes mayores a 0.9999, de acuerdo al ejemplo realizado).

Capítulo 7. Conclusiones

Las hipótesis y alcances en la realización de este trabajo fueron las siguientes:

- Se utiliza el método de rigidez para el modelado numérico.
- Sólo se modelaron elementos tipo barra (unidimensionales).
- Cada elemento se divide en sub-elementos para considerar rigidez y masa distribuida.
- Cada elemento tiene zonas infinitamente rígidas en sus extremos.
- El daño sólo se modela en los extremos de los elementos.
- El daño se modela como una degradación del momento de inercia de los elementos.
- El parámetro de daño que se utiliza es el incremento de energía potencial debido a cambios en formas modales.
- Sólo se consideran componentes de traslación horizontal de las formas modales.

De los resultados obtenidos en el capítulo 4 (Análisis paramétrico), se concluye que:

- No es posible definir los elementos dañados únicamente observando un vector de incremento de energía potencial.
- Cada caso de unidaño tiene un vector $\{\Delta P\}$ (incremento de energía potencial) característico que lo diferencia de los demás casos.
- Es aplicable el principio de superposición para representar casos de multidaño a partir de casos de unidaño. Esto únicamente en el incremento de energía de las columnas.
- El efecto de daño incremental puede representarse con ecuaciones polinómicas.

De los resultados obtenidos en el capítulo 5 (Propuesta de metodología de detección de daño estructural), se tiene que:

- Puede existir un número infinito de soluciones para reproducir un caso de multidaño.
- La presencia de componentes negativas en el vector $\{D\}$ (vector de escalamiento) indica un incremento en la rigidez, lo cual no es posible. Un vector $\{D\}$ que presente estas componentes debe descartarse.
- El uso de una medida de comparación (coeficiente de correlación) entre vector $\{\Delta P\}$ esperado entre el obtenido es necesario para encontrar soluciones en la detección de daño.
- La aplicación de la metodología de detección de daño debe hacerse por etapas. Esto es para encontrar aquellas combinaciones con el menor número de casos de daño que mejor reproduzcan el vector $\{\Delta P\}$ obtenido de una estructura dañada.
- No es posible detectar daño en los nodos superiores de las columnas ni en las vigas cuando el daño se presenta en el entrepiso de planta baja (en el ejemplo realizado).
- Es posible detectar todos los tipos de daño definidos en este trabajo en entrepisos intermedios. Para poder detectar daño en vigas, es necesario que las posibles combinaciones de daño tengan un coeficiente de correlación mayor al requerido para detectar daño en las columnas.
- Se puede detectar qué columnas presentan daño, pero puede confundirse el nodo dañado.
- En la detección de daño en vigas, la metodología propuesta puede confundir la viga dañada con una ubicada paralelamente en la misma crujía.
- Se necesitan coeficientes de correlación mínimos de 0.9999 para poder detectar daño en todos los elementos dañados (para los ejemplos realizados). No siempre es posible encontrar la combinación que represente exactamente el caso de multidaño real. La combinación de casos de daño con mayor coeficiente de correlación suele ser la respuesta correcta.

Del capítulo 6 (Simulación experimental) se concluye que:

- La metodología es aplicable en simulaciones experimentales. Para esto se requiere que el MAC entre formas modales obtenidas con ERA y las analíticas sin daño sean del orden de 0.99995 o mayores (para el ejemplo realizado).
- Los vectores $\{\Delta P\}$ obtenidos en simulaciones experimentales sólo son aproximaciones de los obtenidos analíticamente. Por esto, los resultados de las simulaciones pueden diferir de los resultados analíticos.
- El daño detectado en vigas puede sobreestimarse (en los ejemplos realizados, se sobreestimó hasta en un 14%).
- Diferentes registros de respuestas pueden dar los mismos resultados en la detección de daño, pero pueden obtenerse más resultados en uno que en otro.
- Las combinaciones con mayor coeficiente de correlación pueden no ser la respuesta correcta (todos los elementos correctos con el tipo de daño correcto).
- Se necesitan coeficientes de correlación mínimos de 0.9999 para detectar daño en todos los elementos dañados. La combinación de casos de daño con mayor coeficiente de correlación puede no ser la respuesta correcta (todos los elementos correctos con el tipo de daño correcto).

En resumen, con respecto a la metodología propuesta de detección de daño:

- Es capaz de detectar la presencia daño estructural.
- Es capaz de determinar qué columnas están dañadas, pero puede confundir el nodo dañado.
- Es capaz de detectar daño en vigas, pero puede confundir el elemento dañado.
- Es capaz de cuantificar el nivel de daño presente en los elementos.

Por lo anterior, el nivel de detección de daño que la metodología alcanza, es el Nivel 3 (cuantificación de la severidad del daño, ver capítulo 1.1.1).

Capítulo 8. Trabajos futuros

Como trabajos futuros, se deberán realizar análisis que consideren:

- Presencia de daño en distintos entrepisos.
- Presencia de daño en puntos intermedios de los elementos.
- Distintas longitudes de daño para cada nivel de daño.
- Modelado y presencia de daño en elementos tipo placa y diagonales.
- La interacción suelo-estructura en el modelado.
- Estructuras más complejas.
- Irregularidad en planta y/o en elevación en la estructura.
- Otros tipos de daño.
- Estructura dañada a partir de un análisis no lineal.

Además, se requiere:

- Encontrar la razón por la cual no es posible aplicar el principio de superposición en el incremento de energía que desarrollan las vigas.
- Estudiar la posibilidad de detectar mejor el daño utilizando la metodología con un diferente parámetro de daño.
- Encontrar la forma de detectar daño en vigas con mayor facilidad y precisión.
- Comprobar la metodología con datos experimentales reales.

Capítulo 9. Bibliografía

1. S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime & D. W. Shevitz (1996), "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review"
2. Z. Y. Shi & S. S. Law (1998), "Structural damage localization from modal strain energy change".
3. A. Entezami & H. Shariatmadar (2014), "Damage localization in shear buildings by direct updating of physical properties".
4. G. C. Yao, K. C. Chang & G. C. Lee (1992), "Damage diagnosis of steel frames using vibrational signature analysis".
5. G. Hearn & R. B. Testa (1991), "Modal analysis for damage detection in structures".
6. J.C. Asmussen, S.R. Inrahim & R. Brincker (1998), "Random Decrement: Identification of Structures Subjected to Ambient Excitation".
7. J.C. Asmussen, (1997), "Modal Analysis Based on the Random Decrement Technique".
8. Q. Qin, H. B. Li & L. Z. Qian (2000), "Modal identification of Tsing Ma Bridge by using improved Eigensystem Realization Algorithm".
9. J. N. Juang & R. S. Pappa (1985), "An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction".
10. J. M. Caicedo, S. J. Dyke & E. A. Johnson (2004), "Natural Excitation Technique and Eigensystem Realization Algorithm for Phase I of the IASC-ASCE Benchmark Problem: Simulated Data".
11. M. Pastor, M. Binda & T. Harčarik (2012), "Modal Assurance Criterion".